

Національний технічний університет України  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

імені Ігоря Сікорського»  
МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра технології машинобудування  
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»

УДК 621.9

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_

Ю.В.Петраков

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2019р.

**Магістерська дисертація на  
здобуття ступеня магістра**

зі спеціальності **131. Прикладна механіка. Технології машинобудування**  
(код і назва спеціальності)

на тему: підвищення довговічності зубчастих коліс шляхом зміцнення поверхонь  
зубців

Виконав (-ла): студент (-ка) 6 курсу, групи **МТз – 81мп**  
(шифр групи)

Богомаз Пьотр Валерійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник д.т.н., професор Воронцов Б.С.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант

\_\_\_\_\_

(назва розділу)

\_\_\_\_\_

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент

\_\_\_\_\_

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_

(підпис)

Київ – 2019 року

**Національний технічний університет України**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ**  
**імені Ігоря Сікорського»**

**МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ**

Кафедра технології машинобудування

(повна назва кафедри)

Кафедра технології машинобудування

Спеціальність **131. Прикладна механіка.**

Спеціалізація **Технології виготовлення літальних апаратів**

(код і назва)

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Ю.В. Петраков

(підпис)

(ініціали, прізвище)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

**на магістерську дисертацію студенту**

Богомаз Пьотр Валерійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації : Підвищення довговічності зубчастих коліс шляхом зміцнення поверхонь зубців

науковий керівник: Воронцов Б.С., д.т.н., професор,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. № \_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом закінченої дисертації «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

3. Об'єкт дослідження: процес підвищення довговічності зубчастих коліс шляхом зміцнення поверхонь зубців.

4. Предмет дослідження: вплив іонно-плазмового термоциклічного азотування на довговічності зубчастих коліс.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: збільшення надійності, зносостійкості і довговічності і підвищення довговічності зубчастих коліс шляхом зміцнення поверхонь зубців; розробити Startup-проекту.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу : презентація PowerPoint

7. Орієнтовний перелік публікацій:

- Воронцов Б.С., Богомаз П.В., «Технологія термічного зміцнення зубчастих коліс», викладено у збірнику матеріалів конференції ( №52 від 31 жовтня 2019 р.) Тенденції та перспективи розвитку науки і освіти в умовах глобалізації, від 31 жовтня 2019р. м. Переяслав-Хмельницький, Україна - 410 с.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд літературних джерел	02.10.2019	
2	Ознайомлення з існуючими на ринку матеріалами і технологіями	16.10.2019	
3	Формування теоретичних засад проведення дослідження	23.10.2019	
4	Підготовка до публікацій статей	26.10.2019	
5	Постановка експерименту	01.12.2019	
6	Аналіз результатів	04.12.2019	
7	Підготовлення магістерської дисертації	13.12.2019	

Студент

\_\_\_\_\_

(підпис)

Богомаз П.В.

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

\_\_\_\_\_

(підпис)

Воронцов Б.С.

(ініціали, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Робота виконана на 78 сторінках друкованого тексту, містить 24 ілюстрації, 25 таблиць. Основною метою є підвищення довговічності зубчастих коліс шляхом зміцнення поверхонь зубців.

**Актуальність теми.** У багатьох випадках використання зубчастих передач зі складними або модифікованими поверхнями і високими якісними показниками дозволяє значною мірою розширити функціональні і підвищити експлуатаційні та інші показники різних машин і механізмів.

У рамках даної роботи приведені результати теоретичного і експериментального дослідження підвищення довговічності зубчастих коліс шляхом зміцнення поверхонь зубців.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота має зв'язок з науково-дослідною Інститут проблем міцності імені Г.С.Писаренка Національної академії наук України.

**Метою роботи** є збільшення надійності, зносостійкості і довговічності і підвищення довговічності зубчастих коліс шляхом зміцнення поверхонь зубців.

**Об'єкт дослідження** – процес підвищення довговічності зубчастих коліс шляхом зміцнення поверхонь зубців.

**Предмет дослідження** – вплив іонно-плазмового термоциклічного азотування на довговічності зубчастих коліс.

**Мета дослідження.** Теоретичні і експериментальні методи: теорія обробки матеріалів азоутванням, включаючи термообробку і застосування новітніх способів обробки деталей.

### **Практичне значення**

Установленні оптимальні режими обробки, які дозволяють як найкраще використовувати можливості зубчастих коліс.

### ***Публікації***

- Воронцов Б.С., Богомаз П.В., «Технологія термічного зміцнення зубчастих коліс», викладено у збірнику матеріалів конференції ( №52 від 31 жовтня 2019 р.) Тенденції та перспективи розвитку науки і освіти в умовах глобалізації, від 31 жовтня 2019р. м. Переяслав-Хмельницький, Україна - 410 с.

***Ключові слова:*** зубчасті колеса, азотування, іонно-плазмове азотування, контактна поверхня зубців шестерень, шестерні.

## ABSTRACT

The work is made on 78 pages of printed text, contains 24 illustrations, 25 tables. The main purpose is to increase the durability of the gear wheels by strengthening the surfaces of the teeth.

**Actuality of theme.** In many cases, the use of gears with complex or modified surfaces and high quality performance can greatly extend the functional and improve the performance and performance of various machines and mechanisms.

The results of theoretical and experimental study of increasing the life of gears by strengthening the surfaces of the teeth are presented in this work.

**Relationship with working with scientific programs, plans, topics.** The work is connected with the Research Institute of Strength Problems named after GS Pisarenko of the National Academy of Sciences of Ukraine.

**The purpose of the work** is to increase the reliability, durability and durability and increase the durability of the gear wheels by strengthening the surfaces of the teeth.

**The object of study** is the process of ion-plasma thermocyclic nitriding of the durability of gear wheels.

**The subject of the study** is the influence of ion-plasma thermocyclic nitriding on the durability of gear wheels.

**The aim of the study.** Theoretical and experimental methods: theory of materials treatment with azotation, including heat treatment and application of the latest methods of processing parts.

**Practical meaning**

Setting optimum machining modes that make the best use of the gears.

**Keywords:** gear wheels, nitriding, ion-plasma nitriding, contact surface of gear teeth, gears.





## Зміст

### Вступ

#### I. Поняття зубчасті колеса.....

##### 1.1. Загальні відомості.....

##### 1.2. Технологія термоциклічною іонного азотування (ТЦО).....

##### 1.3. Використання азотування в промисловості. Переваги плазмового азотування в імпульсному режимі і отримання зміцнених азотованих поверхонь.....

##### 1.3.1. Азотування деталей машин в промисловості.....

##### 1.3.2. Плазмове азотування.....

##### 1.3.3. Процес утворення плазми.....

##### 1.3.4. Іонне азотування в імпульсному режимі.....

#### II. Технологічні особливості процесу азотування та теоретичні передумови отримання зміцнених поверхневих шарів методом іонно-плазмового термоциклічного азотування (ПТА). .....

##### 2.1. Огляд методів відновлення та вибір оптимального методу.....

##### 2.2. Розробка технологічного процесу іонно-імпульсного азотування поверхонь деталей.....

##### 2.2.1. Попередня підготовка поверхні перед азотуванням.....

##### 2.3. Технологічні особливості методу іонно-плазмового азотування....

##### 2.4. Регулювання будови шару при іонно-вакуумному азотуванні в імпульсному режимі.....

#### III Теоретична частина досліджень.....

##### 3.1. Устаткування для проведення іонно-плазмового азотування в імпульсному режимі.....

##### 3.2. Принцип роботи установки для іонного азотування в імпульсному режимі.....

##### 3.2.1. Принципова схема установки.....

##### 3.3. Технологічні можливості іонного азотування в зміцненні виробів з конструкційних і інструментальних сталей.....

IV РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ.....	
4.1Маркетинговий аналіз стартап-проекту.....	
4.2. Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї.....	
4.3. Розроблення ринкової стратегії проекту.....	
4.4. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	
4.5. Висновок.....	

## Вступ

Зубчасте колесо - основна деталь зубчастої передачі у вигляді диска з зубами на циліндричній або конічній поверхні, що входять в зачеплення із зубами іншого зубчастого елемента і призначена для передавання руху до цього зубчастого елемента або отримання руху від нього.

Мале ведуче зубчасте колесо, незалежно від числа зубів у машинобудуванні прийнято називати шестірнею, а велике ведене — колесом. Проте часто усі зубчасті колеса називають шестернями.

Зубчасті колеса зазвичай використовуються парами з різним числом зубів з метою конвертування обертового моменту і швидкості обертання валу на виході. Колесо, до якого обертовий момент підводиться, називається приводним (ведучим), а колесо, з якого момент знімається, - веденим. Якщо діаметр ведучого колеса менший за діаметр веденого, то обертовий момент веденого колеса стане більшим при одночасному пропорційному зменшенні швидкості його обертання, і навпаки. Відповідно до передавального відношення, збільшення обертового моменту викликатиме пропорційне зменшення кутової швидкості обертання веденої шестірні, а їх добуток - механічна потужність - залишиться незмінним. Це співвідношення справедливе для ідеального випадку, в якому не враховуються втрати на тертя та інші ефекти, характерні для реальних пристроїв.

Підчас роботи зубчастої передачі зубці коліс періодично взаємодіють між собою. При цьому лінія контакту зубців постійно міняє своє положення на активній поверхні зубців за час знаходження їх у контакті. Наявність ковзання активних поверхонь призводить до виникнення сил тертя між навантаженими зубцями. Такий складний характер навантаження контакту зубців зубчастих коліс є причиною певних руйнувань як поверхневого шару зубців, так і зубців взагалі.

Практика експлуатації зубчастих передач показує, що найбільш характерними є такі види руйнування зубців: втомне викришування активних

поверхонь, поломка зубців, відшаровування поверхневих шарів зубців, абразивне спрацювання, пластична деформація та заїдання зубців.

Нам потрібно визначити найефективніші методи підвищення довговічності зубчастих коліс шляхом зміцнення поверхонь зубців, для отримання необхідних результатів за найменшої собівартості операції.

Завданням для нас є :

- Провести досліди для отримання вхідних даних.
- Провести обрахунки і аналіз вхідних даних.
- Побудувати графіки результатів аналізу даних.

При допомозі Інститута проблем міцності імені Г.С.Писаренка Національної академії наук України та програмного середовища та додатку GearTeq було проведено ряд досліджень і виявлено залежності геометричних і фізичних властивостей зубчастих колес, а також параметри властивостей шліфування до вартості операції. Він же ш і поміг нам створити деякі графіки залежностей. Решту обчислень і графіків було зроблено в програмі MS office Excel.

Таким чином ми визначили залежності між цими даними, побудували математичні моделі цих залежностей і завдяки цьому, створили можливість для вибору найбільш економічно доцільного варіанту.

## І ПОНЯТТЯ ЗУБЧАСТІ КОЛЕСА

### 1.1. Загальні відомості

В Інституті проблем міцності ім. Г. С. Писаренко розроблена принципово нова технологія ПТА, яка заснована на таких академічних розробках, як: теорія термічної втоми, аномальний масоперенос при механічному навантаженні і ефект дискретного енерговвода.

Технологія має наступні переваги:

- використовується нагрів тільки поверхневого шару деталі без прогріву її серцевини. Нагрівання відбувається за рахунок енергії тліючого розряду, тому не потрібно використовувати печі;
- циклічні нагріви і охолодження деталі створюють термічні напруги в поверхневому шарі, що в 2-3 рази прискорює дифузійні процеси і відповідно скорочується час обробки;
- форма і розміри деталі і чистота її поверхні залишаються без змін, тому не потрібна фінішна механічна обробка;
- скорочення тривалості обробки, циклічний характер швидкісного дискретного енерговвода і нагрів тільки поверхневого шару скорочують витрати електроенергії до 10 разів.

Технологія іонно-плазмового термоциклічного азотування захищена патентами України і не має аналогів у вітчизняній та світовій практиці.

Попередні промислові випробування підтвердили можливість заміни газового азотування і цементації на ПТА в суміші азоту і аргону.

Основними споживачами обладнання і технології іонно-плазмового азотування є автомобільні, тракторні, авіаційні, суднобудівні і судноремонтні, машино- і верстатобудівні заводи, заводи по виробництву сільськогосподарської техніки, насосного та компресорного обладнання, шестерень, підшипників, алюмінієвих профілів, енергетичних установок і ін.

Для формування дифузійних шарів методом вакуумного іонно-плазмового термоциклічного азотування в Інституті проблем міцності імені Г.С. Писаренко НАН України був створений діючий комплекс технологічного забезпечення

процесу зміцнення поверхневих шарів деталей іонно-плазмовим термоциклічним азотуванням «Віпа-1», що складається з вакуумної камери (ВК) і автоматизованої системи контролю та управління (АСКУ) (рис.1).

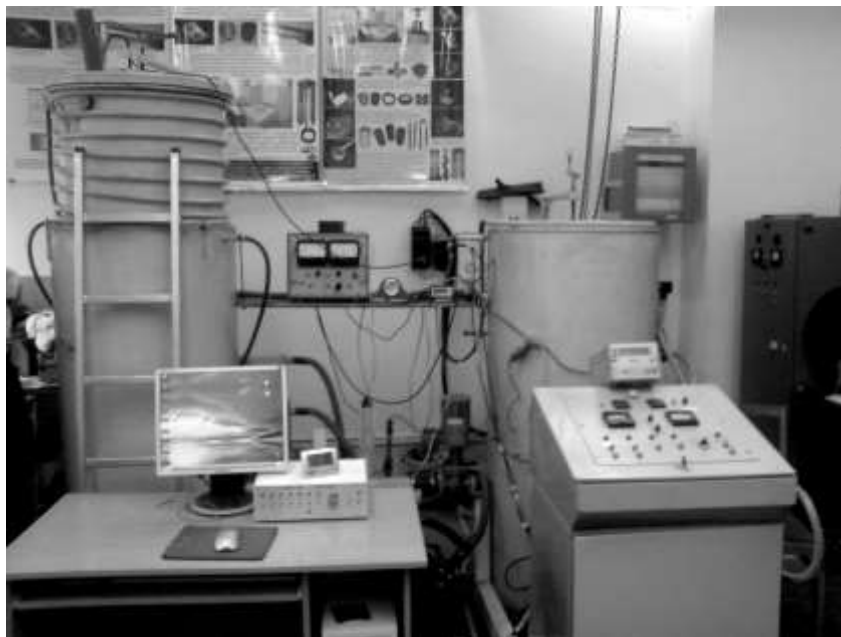


Рис. 1.1. Загальний вид установки «ВИПА-1»

АСКУ включає наступні елементи: система електроживлення (блок завдання і регулювання напруги, датчик короткого замикання) система вимірювання та регулювання температури (датчик короткого замикання, блок індикації і регулювання температури); система вакуумування (блок вимірювання вакууму, блок управління системою вакуумування; вакуумні насоси і клапани); блок забезпечення газом; вакуумна камера; блок комутації з персональним комп'ютером (ПК); ПК.

АСКУ працює наступним чином. Після завантаження в вакуумну камеру попередньо обробленої деталі на ПК задається необхідне значення тиску газу в ВК. Через блок комутації (БК) з ПК команда надходить на блок управління системи вакуумування (БУСВ) і далі на електромагнітні клапани (КЕМ - 1, КЕМ - 2) і вакуумні насоси (ВН - пусковий і робочий). Ступінь вакуумування в ВК вимірюється за допомогою блоку виміру вакууму, інформація з якого надходить через БК на комп'ютер. Після досягнення встановленої вакуумування в ВК автоматично відключається пусковий насос ВН і

включається робочий. При цьому задається на ПК робочу ступінь вакуумування в ВК. Управління подачею газу в ВК протягом всього процесу дифузійного насичення здійснюється через БК і блок подачі газів. Величину робочого тиску в камері в процесі азотування підтримують залежно від площі, маси і конфігурації оброблюваної деталі.

Для забезпечення необхідних параметрів технологічного процесу імпульсного ППТА на АСКУ задають швидкість росту робочої напруги і її максимальне значення.

Температурний режим процесу задають шляхом встановлення на блоці індикації та регулювання температури (Бірт) верхнього і нижнього порогів температури. Інформація про поточну температуру деталі в ВК знімається оптичним пірометром системи вимірювання та регулювання температури і потрапляє в Бірт. Після досягнення заданої температури процесу азотування відбувається автоматичне зниження вихідної напруги і охолодження деталі до величини нижнього порога температури. Потім вихідна напруга знову автоматично підвищується до досягнення верхньої межі температури деталі. Таким чином, відбувається автоматичне регулювання процесу азотування: величини спрацювання регулятора напруги (верхнього і нижнього порогів температури). Це дозволяє подавати на деталь пульсує напруга і отримувати пульсуючі термоциклів, що значно підвищує швидкість дифузійного насичення деталі азотом.

Час азотування залежить від матеріалу деталі, маси садки, необхідної товщини і фазового складу дифузійного шару.

Технологічні параметри формування зміцнених шарів жароміцного сплаву ЧС-70 на основі нікелю:

- температура - 500-550 ° С (розмір температурного циклу - ( $\pm 50$  ° С));
- робочий тиск - 200 Па;
- час обробки - 5 годин;
- співвідношення реакційних газів - 60% Ar + 40% N<sub>2</sub>.

Зміцнення поверхонь зразків відбувалося рівномірно по всьому периметру, що забезпечує рівномірну товщину дифузійного шару.





Рис.1.2 Зубчасті шестерні після азотування



Рис.1.3 Зубчасті шестерні в вакуумній установці

## Поперечний профіль зуба

Профіль зубів коліс як правило має евольвентну бічну форму. Проте, існують передачі з коловою формою профілю зубів (передача Новікова з однією і двома лініями зачеплення) і з циклоїдною. Крім того, в храпових механізмах використовуються колеса з несиметричним профілем зуба.

Параметри евольвентного зубчатого колеса:

- **m** — модуль колеса — є стандартизований найголовніший параметр. Визначається з розрахунку на міцність зубчатих передач. Має, також, враховувати умови експлуатації (наприклад абразивність оточуючого середовища, тип мащення і т. ін.). — Чим більш навантажена передача, тим вищим вибирається значення модуля. А далі через нього визначається решта всіх параметрів. Модуль вимірюється в міліметрах і обчислюється за формулою:

$$m = \frac{d}{z} = \frac{P}{\pi}$$

- **z** — число зубів колеса
- **p** — крок зубів по ділільному колу (позначений фіолетовим кольором)
- **d** — діаметр ділільного кола (позначений жовтим кольором)
- **d<sub>a</sub>** — діаметр кола вершин темного колеса (позначений червоним кольором)
- **d<sub>b</sub>** — діаметр основного кола — евольвенти (позначений зеленим кольором)
- **d<sub>f</sub>** — діаметр кола западин темного колеса (позначений синім кольором)
- **h<sub>ар</sub>+h<sub>фр</sub>** — висота зуба темного колеса, **x+h<sub>ар</sub>+h<sub>фр</sub>** — висота зуба світлого колеса
- **x** — зміщення інструменту при виготовленні колеса з метою коригування зачеплення (допустимі значення — до +/- **0,25m**)

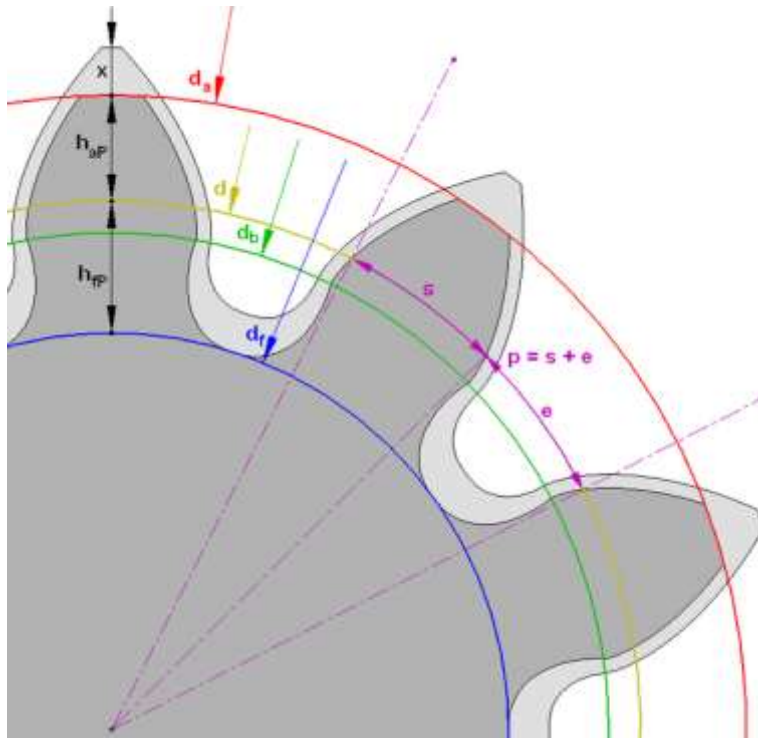


Рис 1.4. Параметри зубчастого колеса

## 1.2 ТЕХНОЛОГІЯ термоциклічною іонного азотування (ТЦО)

ТЦО є екологічно чистою, енергозберігаючою технологією, яка заснована на використанні вакуумної техніки.

Метою розробки технології ТЦО є заміна: застарілого обладнання (газові печі для азотування, що працюють на аміаку), цементацийні установки, як енергоємні і екологічно збиткові); зниженні витрат при виробництві азотування і цементації, за рахунок зниження енергоспоживання; скорочення часу циклу обробки.

У розробленій технології, на відміну від наявних, застосована так зване циклічне вплив на оброблювану деталь, в результаті чого скорочуються терміни обробки і збільшуються поверхневі дифузійні шари, що підвищує якість виробу.

Можливості технології ТЦО:

Деталі (обробка):

- Всі сталі і чавуни.
- Всі нержавіючі сталі.

- Збереження всіх точних розмірів.
- Отримання заданих шарів глибини і твердості.
- Після азотації (нітроцементації) виключається фінішна обробка.

Властивості:

- монофазного структура шару.
- Яскраво виражена в'язкість подслоя.
- Висока опірність зносу.
- Істотна твердість.
- Тривала міцність.

Устаткування для іонного процесу:

- Просте обслуговування.
- Автоматичне управління процесом.
- Висока надійність.
- Висока виробнича готовність.
- Вільно від шкідливих викидів і відходів.

Економічність (прибутковість):

- Низький рівень споживання енергії.
- Короткі цикли обробки.
- Низькі виробничі витрати.
- Низька вартість установки обладнання

### **1.3. Використання азотування в промисловості. Переваги плазмового азотування в імпульсному режимі і отримання зміцнених азотованих поверхонь.**

#### **1.3.1. Азотування деталей машин в промисловості.**

Азотування є хіміко-термічна обробка, яка складається з дифузійного насичення поверхневого шару сталі азотом (азотом і вуглецем) при нагріванні у відповідному середовищі. Азотування найчастіше проводиться при 500-600°C (низькотемпературне азотування). Азотуванню можна піддавати любі сталі перлітного, феритного та аустенітного класів, а також чавуни. В останні роки все ширше використовується високотемпературне азотування (600-1200°C) феритних і аустенітних сталей та тугоплавких металів (Ti, Mo, Nb, V та ін.).

В результаті азотування сталь набирає:

- високу твердість на поверхні, яка не змінюється при нагріванні до 400-450°C;
- високу зносостійкість та низьку схильність до задирів;
- високу межу витривалості;
- високу кавітаційну стійкість;
- добру опірність корозії в атмосфері, прісній воді та парі.

В процесі азотування оброблювані вироби зазнають незначної деформації. Азотований шар добре шліфується і полірується.

Процес низькотемпературного газового азотування проводиться в частково дисоційованому аміаку, в суміші аміаку з азотом, аміаку і попередньо дисоційованому аміаку. Для активації процесу в аміачно-водневу суміш вводять кисень або повітря. Широке використання знаходять атмосфери на основі частково дисоційованого аміаку і вуглецьвмісних компонентів: природного і світильного газу, ендогазу, екзогазу, продуктів піролізу синтину, гасу, спирту тощо.

Для азотування використовують і розплави ціанід-цианатних солей (рідинне азотування).

При низькотемпературному азотуванні (при температурі нижче евтектоїдного перетворення в даній системі) незалежно від того в якому середовищі проводиться обробка, відбувається переважне насичення сталі азотом і в дифузійному шарі утворюються тільки азотисті фази. Вуглець (кисень) впливає лише на формування на поверхні нітридної фази, яка в залежності від цього може бути карбонітридною або карбооксінітридною.

### **1.3.2. Плазмове азотування.**

Не дивлячись на очевидність переваг азотування по відношенню до інших методів поверхневого зміцнення, застосовність його довгий час залишалася пріоритетом унікальних випадків машинобудівного виробництва – деталей літальних апаратів, морських суден, особливо прицевійних станків тощо. Більш широкому розповсюдженню методу заважала винятково висока трудомісткість технологічних процесів, неможливість „глибокого„ поверхневого зміцнення, хрупкість поверхневих зон азотованого шару, різке погіршення шорсткості азотованої поверхні, спотворення геометричних розмірів деталей.

Першим кроком у вирішенні перелічених проблем було створення в 60-х роках принципово нової схеми азотування, де використовувалася плазма тліючого розряду. Подальший розвиток методу, в тому числі в роботах вітчизняних вчених (Б.Н. Арзамасова, Ю.М. Лахтина), призвело в наш час до розробки доступних промислових технологій і зразків обладнання для плазмового азотування.

Із досвіду газового азотування в аміаку відомо, що підвищення тиску сприяє посиленню дифузії азоту в поверхневий шар деталей. В вакуумі дифузія азоту в металічну поверхню дуже незначна, якщо не застосовуються додаткові технічні засоби, які підсилюють її.

Термін „плазма„ затвердився в побуті у інженерів і фізиків після 1928 року під час досліджень американського фізика Ірвінга Ленгмюра. Вивчаючи

властивості тліючого розряду, він виявив дивні колективні коливання електронів відносно іонів.

Головною особливістю плазми являється колективний характер всіх взаємодій і станів частинок, які її складають.

Перші патенти по використанню тліючого розряду в якості засобу для „транспортування„ азоту були отримані в 30-х роках. За рекомендаціями фізика Венельта промисловець Б. Бергхауз займався тліючим розрядом. Важливою умовою для його використання, на думку Венельта, було перетворення тодішнього „слабострумного „ тліючого розряду в стабільний „сильнострумний „. Це вдалося Бергхаузу, який використав умови електричного розряду. При тиску в декілька мілібар ( $1 \text{ бар} = 0,1 \text{ МПа}$ ) і напрузі в декілька сотень вольт був отриманий стабільний сильнострумний тліючий розряд з іонами азоту. Шляхом використання механізмів випаровування і розпилення вдалося заглибити ці іони в поверхню матеріалів на основі заліза, тобто азотувати їх. Вже в 30-і роки з успіхом використовувалася ця технологія азотування в тліючому розряді.

Під час другої світової війни майже всі документи по газовому азотуванні в тліючому розряді були знищені, а отримані в 30-і і 40-і роки результати частково втрачені. Завдяки створенню в 1957 році Спілкою по розвитку досліджень тліючого розряду Кельнського науково-дослідного інституту було закладено новий фундамент технології плазмового азотування в тліючому розряді. Отримані в цьому інституті результати і розроблені способи плазмового азотування, які отримали назву „іонітрування„, знайшли промислове використання в цілому світі.

В розглянуто питання стосовно іонного азотування та вуглеазотування деталей машин виготовлених з різних матеріалів (сталей, чавунів, порошкових матеріалів) на установках і по технологіям, розроблених фірмою Klockner Ionon GMBH. Описані типові уніфіковані установки фірми для проведення іонного азотування різноманітних типорозмірів деталей –від мілкорозмірних деталей масового виробництва до крупногабаритних (довжиною до 14 м) одиничних деталей. Показано можливість використання контролерів і мікропроцесорів для

керування процесом. Розглянуто приклади іонного азотування конкретних деталей: шнеків і екструдерів термопластавтоматів, крупномодульних зубчастих коліс тощо. Відмічено основні переваги іонного азотування по відношенню до традиційних методів поверхневого зміцнення (закалкою СВЧ, газовим і рідинним азотуванням).

В наступній роботі повідомляється про плазмове азотування сталей. Перевагою такого способу азотування є те, що він може виконуватись при низьких температурах. Це дозволяє використовувати його без розміцнювання серцевини виробу при проведенні процесу. Друга перевага способу – рівномірність товщини утворюваного шару, збагаченого азотом. Метод іонного азотування, наприклад, доцільно використовувати для азотування пружин із деяких сталей, які піддаються відпуску при 480°C протягом 1 години, що дозволяє зменшувати зношування пружин при їх експлуатації.

### **1.3.3. Процес утворення плазми.**

В залежності від механізму утворення зарядоносіїв та умов на електродах розряди мають безліч різновидів. При зміні умов виникає взаємоперетворення одних форм розрядів в інші. На рис. 1.1 залежність форми газового розряду від щільності струму і напруги між електродами показана у вигляді статичної вольт-амперної характеристики.

Так, при щільності струму  $j < 1 \text{ мкА/см}^2$  зарядоносіїв мало і для підтримання каналу провідності необхідна дуже висока напруга  $U$  між електродами. Це відповідає області несамостійного розряду (ділянка 0-1). Якщо зменшити опір зовнішнього ланцюга розряду, то процес утворення зарядоносіїв буде розвиватися ефективніше. Це призведе до зниження розрядної напруги і встановлення нормального тліючого розряду (ділянка 2-3), для якого характерна сталість напруги в широкому діапазоні щільності струму. Подальше зменшення опору зовнішнього ланцюга та збільшення щільності струму в каналі провідності визивають спочатку підвищення розрядної напруги і щільності струму (ділянка 3-4 відповідає аномальному



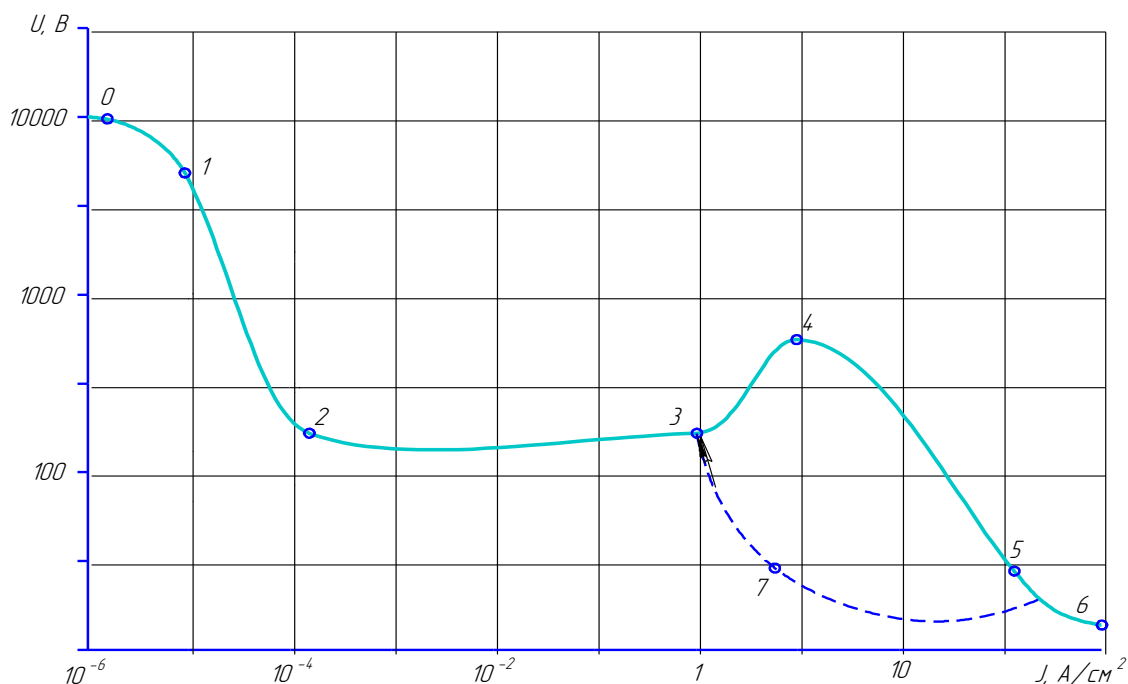


Рисунок 1.5 - Статична вольт-амперна характеристика газового розряду (тліючому розряду), а потім утворення електричної дуги, яка горить при напрузі в декілька десятків вольт. Утворення заряджених частинок в дузі лавиноподібно (ділянка 4-6). Такий хід розвитку розряду повторюється при кожному запалюванні електричної дуги. Якщо збільшувати опір зовнішнього ланцюга розряду і цим обмежувати щільність струму в каналі провідності, процес піде в зворотному напрямку з невеликим зміщенням (гістерезисом) від точки 5 до точки 7 і далі – по кривій 3-2-1-0.

Гістерезис викликаний тим, що на ділянці із щільністю струму 1-10 А/см² починає проявлятися пінч-ефект. Він полягає в тому, що власне магнітне поле струму починає стискати канал провідності, і тим сильніше, чим вище щільність струму. Канал стає тоншим, а кількість заряджених частинок в ньому зростає. При цьому зростає концентрація енергії, що і викликає перехід від механізму провідності газу по типу тліючого розряду до механізму провідності по типу електричної дуги. Тип, або форма розряду залежить від складу, кількості та умов утворення і зникнення часток, які переносять електричні заряди.

#### 1.3.4. Іонне азотування в імпульсному режимі.

Впродовж останніх 30 років проводяться роботи по підвищенню продуктивності та зниженню енергомісткості процесу плазмового азотування. Одним із перспективних методів досягнення поставленої мети являється використання плазмового азотування в імпульсному режимі. Так, в обговорюється питання азотування в плазмі тліючого розряду. Заміна постійного струму при розряді пульсуючим призводить до підвищення якості обробки деталей і дозволяє отримати ряд технологічних переваг: знизити температуру азотування (в деяких випадках до 300°C), що дає можливість повністю уникнути короблення деталей; отримати азотований шар з поверхневою зоною нітридів або без неї (шар нітридів характеризується підвищеною щільністю, що виключає кінцеву доводочну механічну обробку деталей – шліфовку, поліровку); усувати локальні перегріви деталей.

Використання плазмового нагріву тліючим розрядом і газорозрядної плазми пов'язано з різким підвищенням потужності установок по відношенню до потужності відомих раніше пристроїв для іонної очистки, обробки, радіотехнічних приладів тощо. Однак переходи тліючих розрядів в електричні дуги викликають згоряння, розплавлення і вихід з ладу оброблюваних плазмою виробів.

Вирішення проблеми дали дослідження. Виявилось, що незалежно від умов запалювання розвиток дугового розряду починається обов'язково з тліючого. Навіть самі короткочасні електричні дуги, які існують мільйонні долі секунди, розвиваються по траєкторії. Стійкий стан дифузної плазми може тривати від одної мільйонної долі секунди до декількох десятків і сотень секунд в залежності від умов на катоді і в міжелектродному просторі.

В виробничих умовах дифузійне горіння тліючого розряду повинно забезпечуватись протягом багатьох годин при різних умовах, в тому числі і при плазмовій обробці різноманітних виробів, які знаходяться під від'ємним потенціалом і являються катодом. В 60-і роки склалася суперечна ситуація. З

одної сторони, плазмова обробка металів потужним тліючим розрядом давала великий вигравш по часу, енергії і якості, а з іншої, -при збільшенні потужності розряду зростала імовірність його переходу в руйнівну електричну дугу.

Практична перевірка цієї ідеї підтвердила її правильність, ефективність і корисність.

В роботі сталі C45, 20 MnCr5 і X165 CrMoV12 піддавали азотуванню при 525°C, 4 і 8 годин. Застосовували як звичайне газове азотування в аміаку, так і азотування в тліючому розряді з пульсацією струму протягом процесу. Виявлені наступні переваги пульсуючої плазми:

1. зниження споживання енергії;
2. рівномірність товщини азотованого шару по контуру деталей, яка особливо наочно виявляється в отворах та інших важкодоступних для азотування місцях;
3. надійна гарантія відсутності збою тліючого розряду з виникненням дугового;

При пульсуючій плазмі порівняно з звичайним газовим азотуванням в аміаку отримали більшу товщину азотованого шару і підвищену твердість поверхні.

В обговорюються результати іонного азотування деталей із різних сталей в пульсуючій плазмі тліючого розряду. На відміну від звичайного процесу хіміко-термічної обробки в тліючому розряді електричний ланцюг розробленої установки має переривник постійної напруги. Це забезпечує переривчасте протікання струму через робочу розрядну камеру і відповідно переривчасте виникнення-припинення плазми і катоду (деталей). Процес виконується в умовах додаткового „зовнішнього„ підігріву деталей елементами опру. Приводяться характерні параметри процесу азотування (наприклад, для мартенситностаріючих сталей): температура близько 500°C; напруга 750 В; струм при розряді 30 А; тривалість розряду в елементарному циклі 70 мкс; тривалість паузи 800 мкс.

Обробка в пульсуючій плазмі дозволяє:

1. економити енергію;
2. гарантувати відсутність переходу тліючого розряду в дуговий;
3. забезпечити проникнення дифузанту до найбільш важкодоступних ділянок деталей (в отвори, щілини тощо);
4. отримувати більш стабільні результати процесу.

Ковані зразки сталі піддавали азотуванню в середовищі пульсуючої плазми при температурі 540°C протягом 24 годин. В процесі азотування твердість поверхневого шару товщиною 70 мкм збільшується до 958 HV<sub>0,1</sub>. Твердість сталі нижче шару, який азотували, залишилася незмінною (210 HV<sub>0,1</sub>). Дослідження доводять, що плазмове азотування нержавіючої сталі можливе для використання її в протезах (імплантатах).

В наробітках інших як вітчизняних так і зарубіжних фірм та підприємств вказується на можливість іонного азотування різноманітних деталей машин (розподільчих та колінчастих валів, клапанів, пружин тощо), різних сталей (вуглецевих, низько- середньо- та високолегованих, мартенситностаріючих), різних видів чавунів а також титану та його сплавів.

На рис. 1.6 показано осцилограми зміни напруги джерела живлення  $U_{д.ж}$  (штрихові ділянки), напруги на розрядному проміжку  $U_T$ ,  $U_d$  (суцільні лінії) і розрядного струму  $I_T$ ,  $I_d$  (штрих пунктирні ділянки). Їх легко отримати на екрані осцилографа, якщо

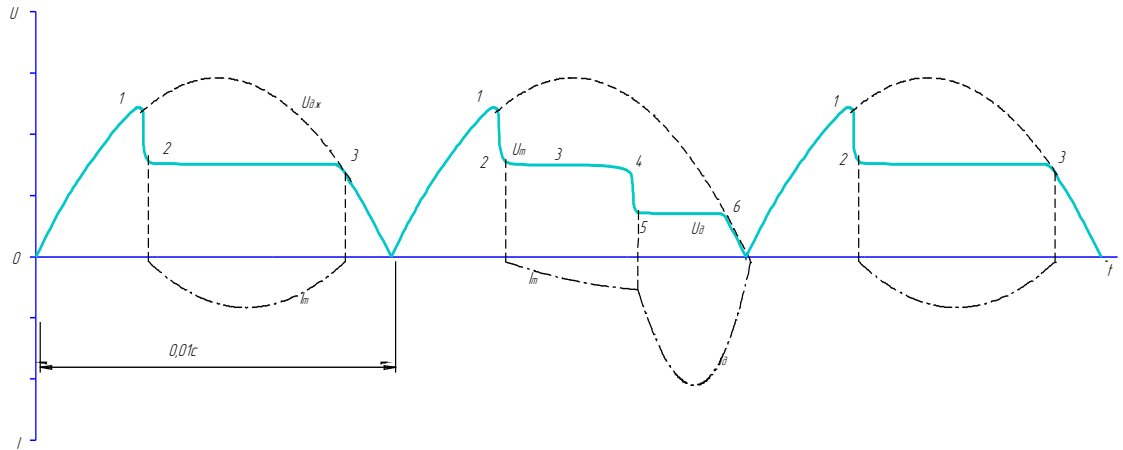


Рисунок 1.6 - Осцилограми зміни напруги, що подається від джерела живлення тліючого розряду, напруги на електродах і струму в розряді.

під'єднати до електродів тліючого розряду відповідні датчики. Осцилограми показують, що струм між електродами протікає з переривами, тобто плазма тліючого розряду „працює„ менше однієї сотієї долі секунди. Вони ж підтверджують, що в будь-якому випадку розвиток плазми починається з пробою (рис. 1.1, точка 1). Потім виникає дифузна плазма тліючого розряду (ділянка 2-3). При втраті стійкості тліючий розряд трансформується в дуговий (ділянка 4-6), що супроводжується зниженням розрядної напруги  $U_d$  і збільшенням розрядного струму  $I_d$  (середній півперіод). Потім напруга падає до нуля і розряд зникає. З початком нового півперіоду процес зародження, розвитку і розпаду газорозрядної плазми повторюється.

Практична перевірка цієї ідеї підтвердила її правильність, ефективність і корисність.

Проведений аналіз літературних даних і патентної документації дозволив класифікувати основні способи азотування по температурним режимам і складу поверхневого шару (рис. 1.6).

В цілому процеси азотування відносяться до числа найбільш ефективних методів підвищення поверхневої твердості, міцності, зносостійкості і корозійної стійкості сталейних виробів в таких середовищах, як повітря, вода, пара тощо. Твердість азотованого шару значно вище, ніж у цементованої сталі, і зберігається при нагріві до високих температур (600-650°C), тоді як твердість цементованого шару, який має мартенситну структуру, зберігається тільки до 200-225°C.

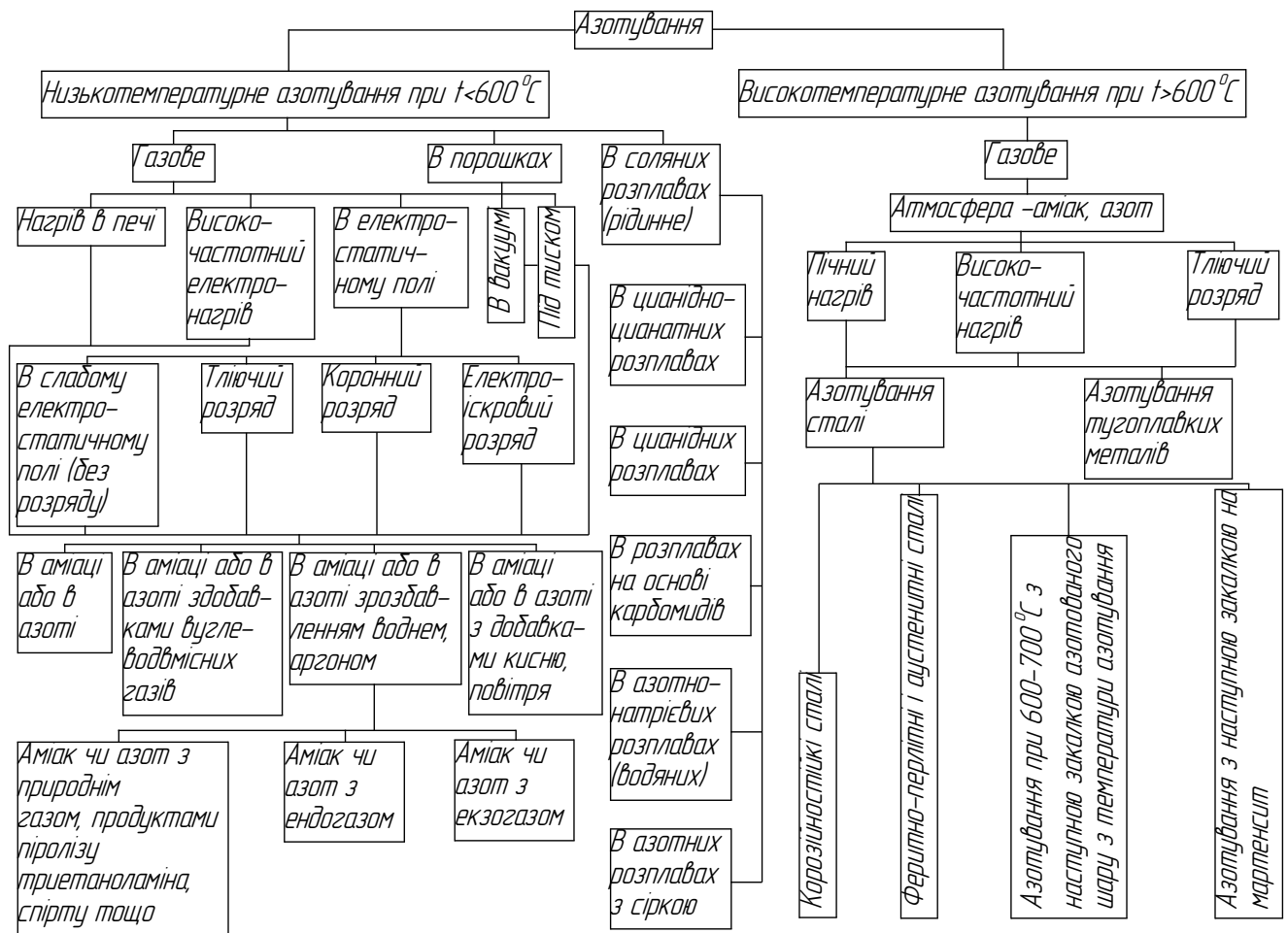


Рисунок 1.7 - Основні способи азотування

Проведений аналіз показав, що метод іонного (плазмового) азотування являється одним із найбільш перспективних для зміцнення поверхневих шарів швидкозношуваних деталей машин. При цьому перевагу слід віддати способу іонного азотування в імпульсному режимі, так як в цьому випадку гарантується збереження в серцевині деталі основних властивостей і первинної структури

матеріалу. Є можливість варіювання температурою процесу в широких межах (350-660°C), ціле направленого отримання азотованого шару ( $\gamma'$ ,  $\epsilon$ ,  $\gamma'+\epsilon$ ), дифузійного шару без шару з'єднань, можливість впливати на механічні властивості. До числа інших переваг слід особливо віднести відсутність забруднення оточуючого середовища. Іонне азотування являється абсолютно нешкідливим процесом. Він не наносить шкоди здоров'ю обслуговуючого персоналу. Крім того, імпульсне плазмове азотування вперше серед інших методів дало можливість відтворювати отримання монофазного нітридного  $\gamma'$ -шару. Тільки завдяки цьому вдалося широко використати в різних областях машинобудування переваги такого в'язкого, не дивлячись на високу твердість, шару з'єднань. Практично незалежний вибір температури азотування і пов'язані з цим можливості глибокого азотування дають цій технології ряд економічних переваг.

Висока стабільність розмірів при відсутності короблення, невеликі зміни шорсткості поверхні, а також простота методів парціального азотування скорочують витрати на додаткову обробку після азотування, прискорення процесу за рахунок імпульсної подачі напруги та струму і роблять плазмове азотування економічним процесом. Об'єднання окремих агрегатів в поточні лінії скорочує число технологічних операцій і може знизити виробничі витрати, особливо у випадку серійного виробництва. В наш час плазмовому азотуванню підлягають самі різноманітні деталі від кульок кулькових ручок до деталей довжиною до 14 м і масою до 24 т.

## **II ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ АЗОТУВАННЯ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ОТРИМАННЯ ЗМІЦНЕНИХ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ МЕТОДОМ ІОННО- ПЛАЗМОВОГО ТЕРМОЦИКЛІЧНОГО АЗОТУВАННЯ (ІПТА).**

### **2.1. Огляд методів відновлення та вибір оптимального методу**

До методів хіміко-термічної обробки відносять газове, плазмове, рідинне азотування та азотування в пастах, а також комбінації цих способів. Загальним для всіх чотирьох методів – нагрів деталі до температури азотування та насичення поверхні деталі азотом. Застосування хіміко-термічної обробки для зміцнення поверхневих шарів деталей дозволяє отримувати деталі зі збільшеною стійкістю при роботі в умовах абразивного зношування.

Основними параметрами азотованих шарів, що визначають їх якість, є твердість покриття та в більшості випадках мінімальна пористість. Ці параметри залежать від багатьох факторів, які характеризують склад і властивості робочого газу, деталі, а також від режимів роботи обладнання при попередній обробці і підготовці поверхні деталі, при утворенні нітридного шару та послідуєючий обробці зміцненої деталі.

Основні режимні параметри хіміко-термічної обробки поверхонь деталей: склад робочої атмосфери, атмосферний потенціал і температура деталей, що обробляються. Від їх оптимальних параметрів головним чином залежать щільність і міцність поверхневого шару, якість азотованої поверхні та тривалість процесу.

Найбільша швидкість процесу спостерігається при рідинному азотуванні, так як в цьому випадку забезпечуються досить високі значення концентрації частинок. Рідинний метод дозволяє скоротити тривалість технологічного процесу, однак не завжди забезпечує високу якість поверхні і стабільність



товщини дифузійного шару. Процес рідинного насичення поверхневих шарів деталей є високотоксичним.

Прямоточний газовий метод дозволяє регулювати активність насичуючої атмосфери (потенціал атмосфери), широко використовується в крупносерійному і серійному виробництві для цементації, нітроцементації і азотування. Але головними недоліками цього методу являється висока токсичність процесу, нерівномірність азотованого шару і велике короблення деталей внаслідок локальних перегрівів деталей.

Іонне азотування, навпаки, дозволяє водночас керувати потенціалом насичуючої атмосфери, усунути перегріви деталей, забезпечує високу якість поверхні і стабільність товщини дифузійного шару і є екологічно чистим процесом.

Тому виходячи з вище сказаного надалі будемо розглядати метод іонного азотування.

## **2.2. Розробка технологічного процесу іонно-імпульсного азотування поверхонь деталей.**

При розробці структурної послідовності технологічного процесу дотримуємося умови забезпечення відновлення деталі у порядку, що дає можливість найкраще застосувати обладнання, зменшити втрати робочого часу, отримати якісну та виготовлену з заданою точністю деталь.

В даній роботі в якості деталі використовувались зубчасті шестерні. Так як технологію ПТА можна вважати фінішною тоді технологічний процес матиме наступні етапи: підготовка зразків; азотування; фінішний контроль.

### **2.2.1. Попередня підготовка поверхні перед азотуванням**

Підготовка зразків до азотування проводилася у відповідності до вимог "Збірника керівних матеріалів ИЗС ім. Е.О.Патона", які передбачають наступні операції:

- обезжирення поверхні деталей;
- промивка розчинниками та лужними розчинами.

Ступінь обезжирення поверхні повинна бути не нижче першої за ГОСТ 9.402-80.

Захист азотованого шару при шліфуванні. Для того щоб азотований шар при шліфуванні і поліруванні залишався придатним для металографічного дослідження (тобто край зразка не був навалений), необхідні міри захисту, наприклад –нікелювання зразка. Зразок може бути покритий хімічним нікелем або спочатку тонким шаром хімічного нікелю, а потім гальванічним нікелем. Шар хімічного нікелю під час створення гальванічного покриття являється бар'єрним шаром, який запобігає дифузії водню, що виділяється при реакції, в азотований шар. Тим самим попереджається можливість відшарування. Аналогічний ефект досягається попереднім обмідненням. Обидва види покриття забезпечують оптимальний захист шару з'єднань від пошкоджень в процесі виготовлення шліфів. Крім того вони забезпечують площинність кромek шліфа.



Рисунок 2.1 – Зразок в камері установки

### **2.3. Технологічні особливості методу іонно-плазмового термоциклічного азотування.**

Використання електричних полів при умовах, що забезпечують виникнення газових розрядів (тілючої аномальної плазми), супроводжується утворенням позитивних іонів насичуючих газів, енергія яких при бомбардуванні оброблюваної поверхні може бути достатня для нагріву деталей до заданої температури хіміко-термічної обробки. В цих умовах азотуванні деталі повинні мати від'ємний потенціал, тобто повинні бути катодом.

Азотування в тліючому розряді проходить в 1,5-2,0 рази інтенсивніше в порівнянні з хіміко-термічною обробкою при радіаційному, пічному нагріві. Так, наприклад, шар товщиною 0,55 мм при 550°C на сталі 40X13 утворюється при іонному азотуванні за 14 годин, а при пічному газовому за 30-35 годин. При цьому досягається також значне скорочення загального часу технологічного циклу (в 3-5 раз) за рахунок зменшення часу нагріву і охолодження садки.

При іонному бомбардуванні позитивними іонами азоту досягається ідеальна депасивація поверхні за рахунок видалення оксидних плівок, і в поверхневому шарі металу товщиною 0,05 мм зростає щільність дислокацій.

Підвищення щільності дислокацій збільшує провідну властивість дифузійної зони, призводячи до росту долі об'ємної дифузії. На відміну від пічного азотування при іонному азотуванні роль граничної дифузії зменшується. На початкових стадіях процесу значна частина азоту дифундує не по границям, а по об'єму феритних зерен, переважно по дислокаційним каналам. При цьому не виникає укрупнення приграничних карбідів, і значно пригнічується утворення карбонітридної сітки по границям первинних аустенітних зерен. Відмічені особливості механізму формування шару при іонному азотуванні реалізуються в кінетиці процесу.

Азотування в тліючому імпульсному розряді значно інтенсифікується при короткочасних витримках (від декількох хвилин до 15-20 годин), так як іонне бомбардування діє тільки на процеси адсорбції і дифузії в поверхневій зоні товщиною не більше 0,05 мм. Із збільшенням тривалості процесу (більше 15-20 годин) перевага в швидкості формування шару у іонного азотування по відношенню до пічного зменшується.

При іонному азотуванні високий градієнт концентрації, яка являється рушійною силою процесу, встановлюється в перші хвилини насичення. При пічному азотуванні концентрація азоту плавно підвищується і досягає максимуму тільки через 30 хвилин з початку процесу. Створення при іонному азотуванні граничного градієнту концентрації на різних стадіях насичення (до

20 хвилин), активація поверхні і ескалація дефектів в поверхневій зоні супроводжуються інтенсивним поглинанням азоту і завершенням формування шару по твердості протягом перших 5 хвилин процесу (рис. 2.2.).

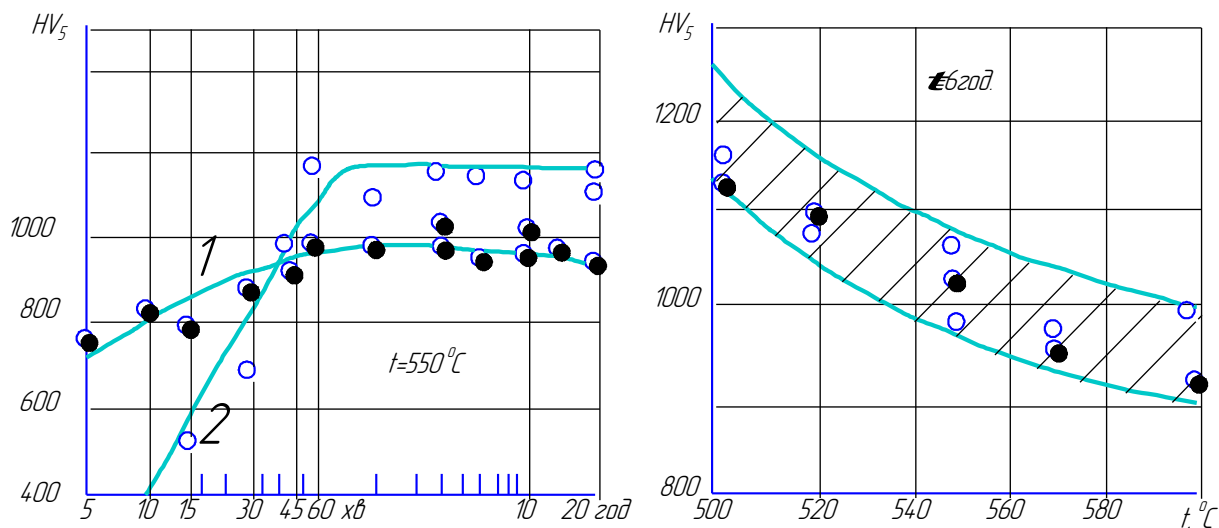


Рисунок 2.2 - Вплив температури і тривалості іонного азотування в імпульсному режимі на твердість сталі 38X2МЮА

Товщина і будова дифузійного шару залежать від температури, тривалості процесу, розрідження і складу азотовмісної атмосфери. Відомо, що для протікання любого процесу необхідно, щоб зміна ізобарно-термічного потенціалу була менше нуля:

$$\Delta G_T < 0.$$

Для складних термодинамічних систем, якими являються і процеси азотування в електричному полі, необхідно враховувати і роботу поля над системою ( $\Delta L$ ), тоді умова протікання процесу можна записати у вигляді  $\Delta G_T + \Delta L < 0$ , де  $\Delta G_T$  через рівноважний потенціал атмосфери пов'язано рівнянням (2.1)

$$\Delta G_T = \Delta G_T^0 + RT \ln \pi_N, \quad (2.1)$$

а  $\Delta L$  визначається параметрами електричного розряду (поля) по струму, напрузі, тиску, швидкості відкачки насичуючого газу і температурі (2.2):

$$\Delta L = \frac{UI}{S_p p} RT, \quad (2.2)$$

де  $U$  –напруга;  $I$  –струм;  $S_s$  –швидкість відкачки;  $p$  –тиск в камері;  $T$  – температура.

Тоді активність або насичуючий потенціал атмосфери в умовах впливу електричного поля ( $A_K$ ) може бути визначений за рівнянням (2.3):

$$A_K = \pi_N - a_N \pi_O \exp \frac{\Delta L}{RT} \quad (2.3)$$

або

$$A_K = \pi_N - a_N \pi_O \exp \frac{UI}{S_s p} \quad (2.4)$$

де  $\pi_N$  - потенціал атмосфери за відсутності розряду, а друга частина рівняння враховує зміну потенціалу під дією поля. Так як обидві частини рівняння залежать від одних і тих самих технологічних параметрів ( $p$ ,  $T$ , складу атмосфери), при збільшенні цих параметрів різниця (тобто потенціал насичуючої атмосфери  $A_K$ ) буде описуватись екстремальною залежністю.

#### **2.4. Регулювання будови шару при іонно-вакуумному азотуванні в імпульсному режимі**

Регулювання будови азотованого шару досягається зміною азотного потенціалу атмосфери, підтримуючи який на рівні розчинності азоту в тій чи іншій фазі, можна отримувати шар, який складається тільки з  $\alpha$ -твердого розчину, формувати на поверхні нижчий нітрид  $\gamma'$ -фазу, або отримувати  $\varepsilon$ -фазу із заданою концентрацією азоту (рис. 2.3.).

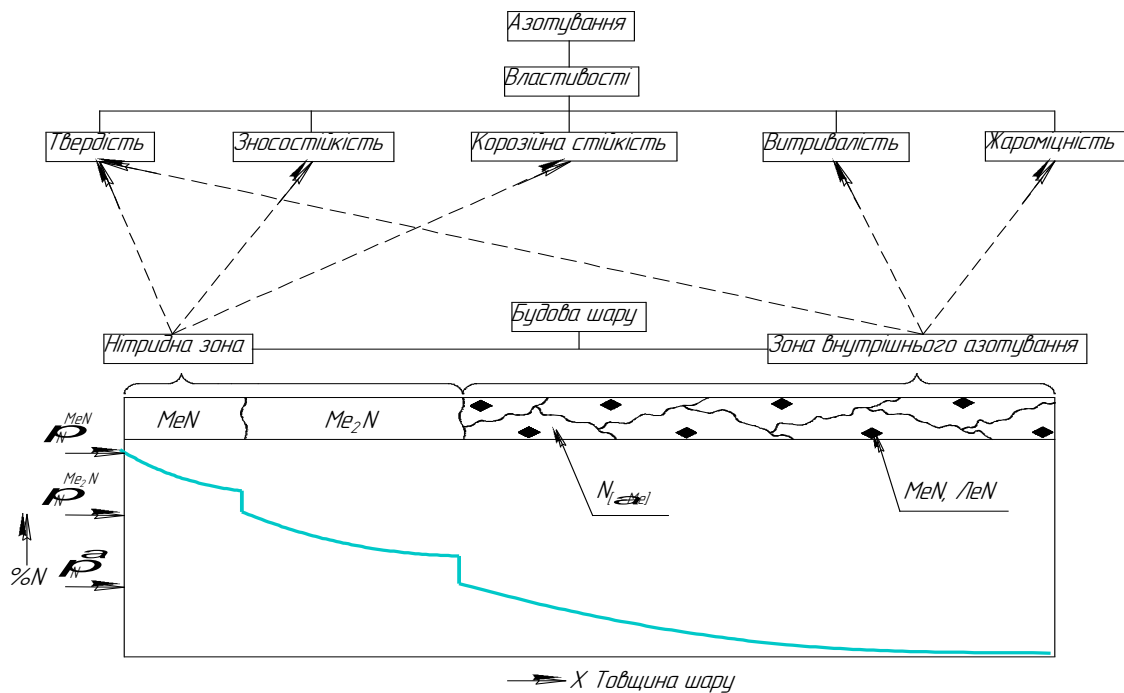


Рисунок 2.3 - Схема регулювання будови азотованого шару

При радіаційному нагріві будову шару можна регулювати, розбавляючи азот киснем, повітрям, вуглевмісними газами, використовуючи вакуум і відповідно змінюючи азотний потенціал насичуючого середовища. При азотуванні в тліючому розряді будова шару регулюється за рахунок зміни в співвідношенні процесів катодного і зворотного катодного розпилення. Ці процеси залежать від параметрів розряду: тиску, питомої потужності, складу атмосфери.

Азотування в пульсуючому тліючому розряді дозволяє регулювати будову шару при розчиненні азоту аргоном і вуглевмісними газами. При азотуванні в азоті утворюється композиційний шар з поверхневою нітридною зоною, що складається переважно з  $\gamma'$ -фази.

Отримання дифузійного шару на базі високоазотистого твердого розчину без поверхневої нітридної зони досягається за рахунок розчинення азоту аргоном в режимі катодного розпилення при тискові 39-78 Па.

Аргон має масу іона, яка переважає масу іона азоту, активно розпилює нітридну зону, що утворюється на поверхні виробу в процесі азотування.

Введення аргону до 40% (об.) практично не впливає на товщину структурних складових шару. При вмісті аргону в суміші з азотом більше 40% (об.) проходить зменшення поверхневої нітридної зони і збільшення зони внутрішнього азотування (рис. 2.3.).

Метод ПТА заснований на зміні напружено-деформованого стану поверхні (постійному накопиченні від циклу до циклу позитивних змін в структурі металів за рахунок впливу імпульсів короткої тривалості і великої амплітуди) реалізується за допомогою оригінальної вакуумної установки.

В основі запропонованої технології лежить процес, пов'язаний з дискретним введенням енергії, виникненням і релаксацією напружень в оброблюваному матеріалі (рис.2.4 а, б) накопиченням дефектів кристалічної будови, за рахунок чого істотно збільшується кінетика дифузії, що призводить до її аномальної течії. Внаслідок цього створюються умови для перерозподілу компонентів у твердому розчині, подрібнення фаз, а, отже, для підвищення твердості, міцності і ударної в'язкості.

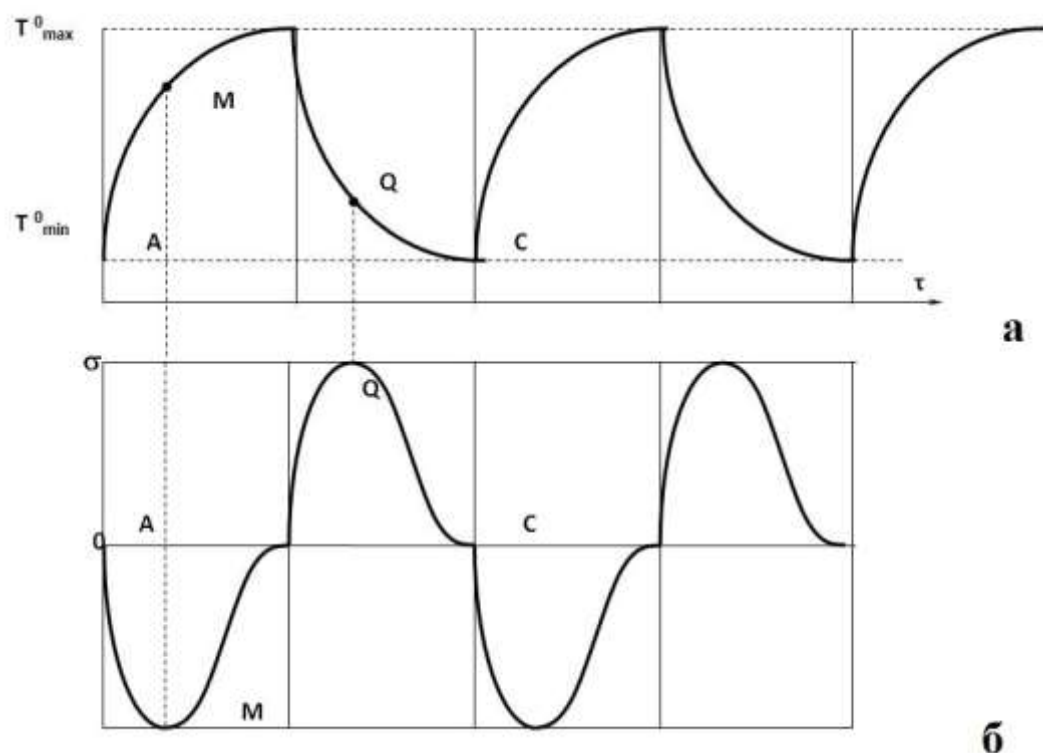


Рисунок 2.4 Зміни мікронапруг в поверхневому шарі (б) від температурного циклу (а)

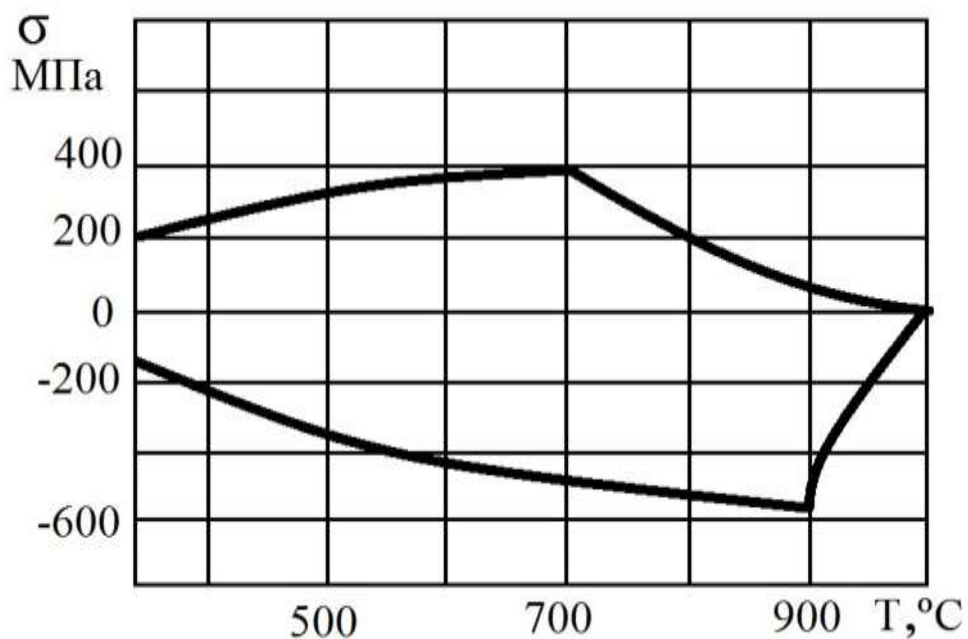


Рисунок 2.5 Діаграма накопичення напружень в основі матеріалу в залежності від температури процесу.

На діаграмах показані мікронапруги, що виникають в шарі матеріалу (рис. 2.4). У точці М досягається максимальне значення стискають (негативних) напруг. При зниженні температури (рис.2.4а) досягаються максимальні розтягуючи (позитивні) напруги в точці Q (рис.2.4б). Таким чином, можна розрахувати сумарне значення напруг в залежності від температури в деталі (рис.2.5).

Реалізація розробленого методу ПТА досягається за допомогою сформованих імпульсів струму (рис. 2.6а), які здійснюють дискретний ввід енергії, що підводиться. Таке технологічне рішення дозволяє скоротити час нагрівання деталі (рис. 2.7) і час процесу дифузійного насичення поверхні.



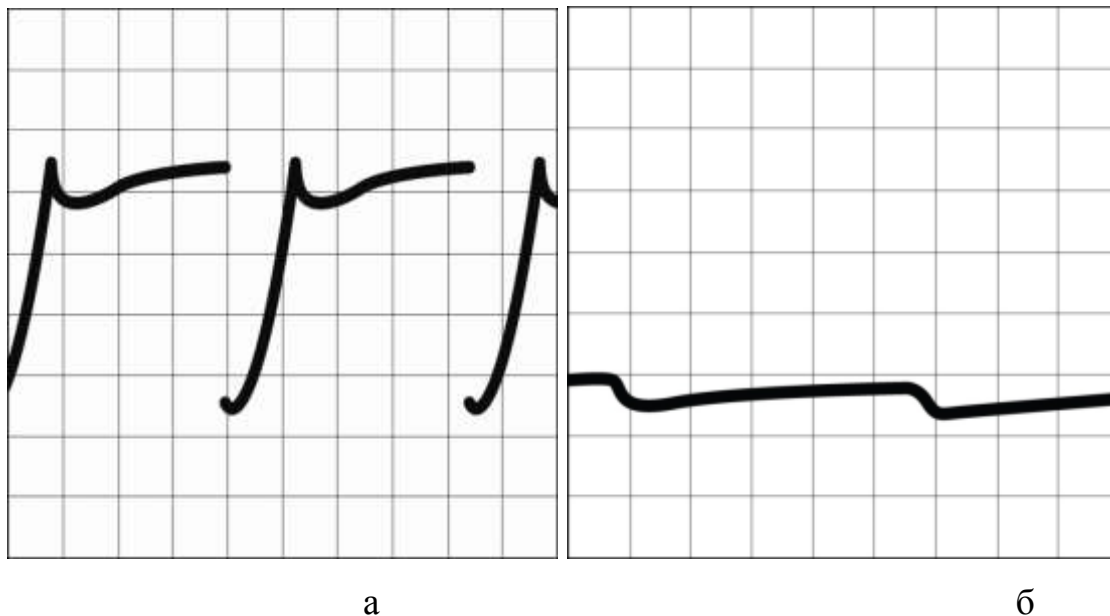


Рисунок 2.6 Форма імпульса: а – ПТА, б – ізотермічний режим ХТО

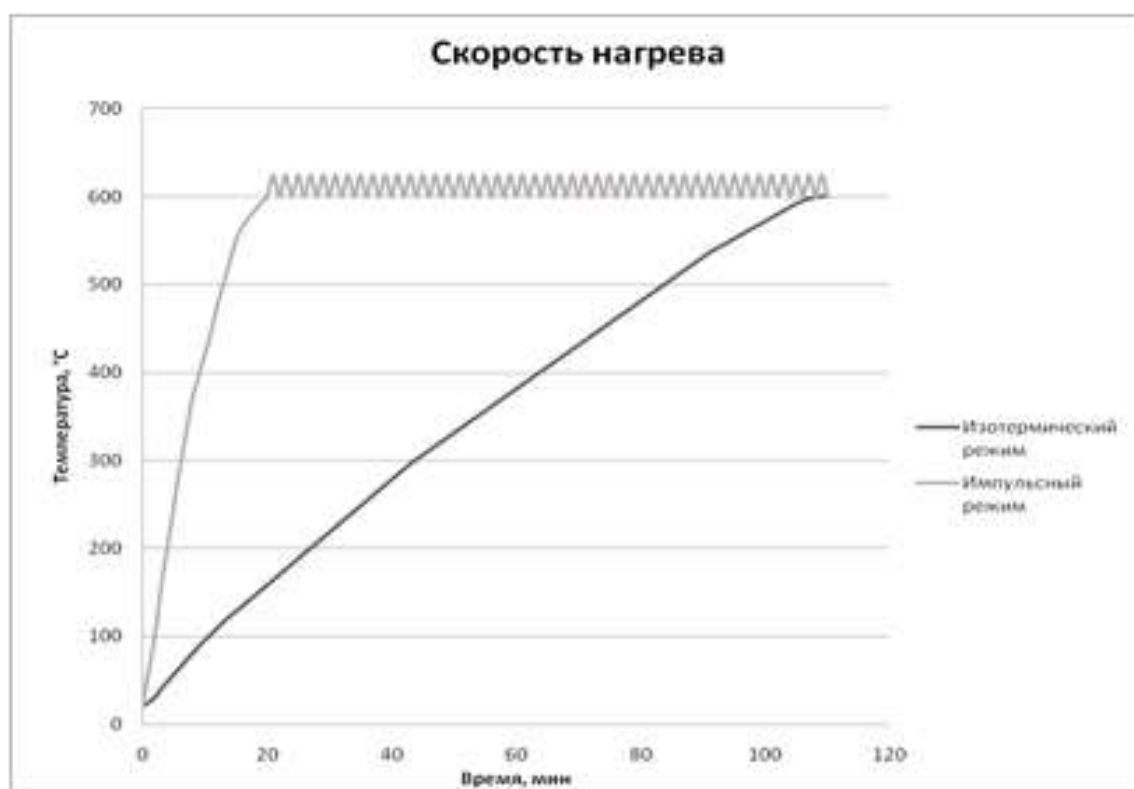


Рисунок 2.7 Швидкість нагріву зразків методом іонно-плазмового азотування при ізотермічному і імпульсному режимах.

Іонно-плазмовому термоциклічному азотуванню піддавалися зразки сталі 40Х13. Використовувалося два технологічних підхода: ізотермічний і термоциклічний.

Азотування зразків одним і другим методом проводилося в суміші газів азоту і аргону (в співвідношенні 20% - 80%). Час азотування становив 360 хв., При робочому тиску 120 Па. Температура процесу - 550 °С (при ізотермічному режимі) і  $550 \pm 25$ ,  $\pm 50$ ,  $\pm 100$  °С (при термоциклічному режимі). Охолодження зразків проходило в камері при тиску 1,5 - 2 Па.

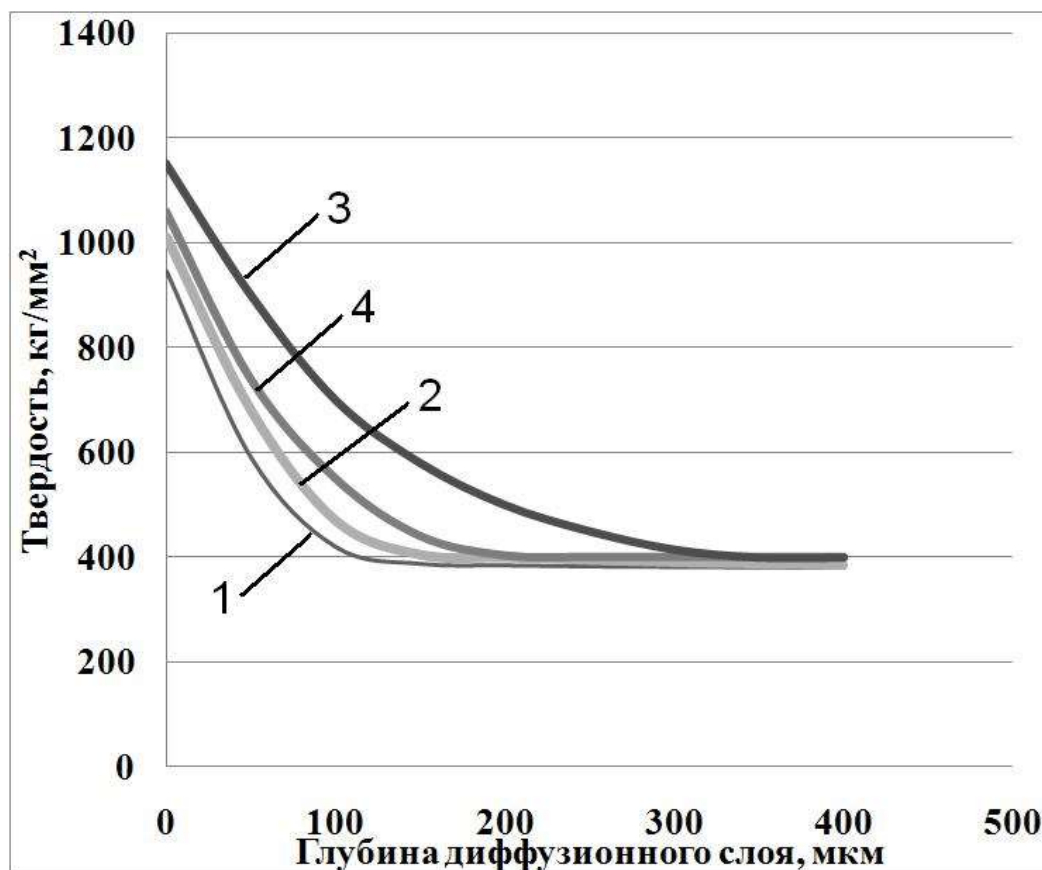


Рисунок. 2.8 Вплив тривалості циклів на глибину дифузійного шару

1 - при ізотермічній обробки; 2 - при циклюванні  $\pm 25^{\circ}\text{C}$ ;

3 - при циклюванні  $\pm 50^{\circ}\text{C}$ ; 4 - при циклюванні  $\pm 100^{\circ}\text{C}$

Експериментально визначено, що застосування термоциклічного режиму більш ефективно, ніж ізотермічного режиму (рис. 2.7). Отримані дані показали, що циклічна обробка в режимі  $\pm 50^{\circ}\text{C}$  дозволяє досягти максимальної твердості поверхневого шару (рис 2.7.), Тим самим знизити знос робочих частин деталі при роботі в абразивних середовищах і збільшити термін служби в 2 - 4 рази.

### **ІІІ ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА ДОСЛІДЖЕНЬ**

#### **3.1. Устаткування для проведення іонно-плазмового азотування в імпульсному режимі.**

Дослідження процесу іонно-плазмового термоциклічного азотування для зміцнення поверхневих шарів деталей зубчастих коліс, в нашому випадку зразків зі сталі 40Х13 здійснювалося на спеціальній установці «ВИПА-1» (рис. 3.1).

Установка включає в себе місткість вакуумну, підвіску, контролери закриття кришки та подачі води, блок вимірювання тиску та температури, блок контролю та регулювання, задатчик температури, блок живлення, клапани напуску атмосферного повітря та азоту, попередньої та вакуумної відкачки, балон з азотом та аргоном, повітряний фільтр із повітрезабірником.



Рисунок 3.1 – Загальний вид установки «ВИПА-1»

Параметри установки для дослідження процесу іонно-плазмового термоциклічного азотування :

1.	Потужність номінальна, кВт	25
2.	Первинна напруга, В	220
3.	Напруга тліючого розряду, В	50...1000
4.	Номінальна сила струму розряду, А	30
5.	Тривалість імпульсу, мкс	20
6.	Період імпульсу, мкс	0...200
7.	Скважність імпульсу	0...10

8.	Об'єм робочої камери, м <sup>3</sup>	0,36
9.	Максимальна маса оброблюваних деталей, кг	2000
10.	Робочий тиск газів, Па	10...1000
11.	Кількість камер азотування, шт	1
12.	Розміри робочого простору, мм:	
	Діаметр	600
	Висота	1250
13.	Габаритні розміри, мм:	
	Діаметр	700
	Висота	1475

Табл.3.1 характеристики установки ВПА-1

Контроль електричних параметрів (напруга, струм) здійснювався по спеціально відтарованому вольтметру типу Э 365-1 та спеціально відтарованому амперметру типу Э 8021 з трансформатором струму ТТ5/50 встановлених в первинному колі установки на пульті керування. Оцінка величини електричного струму та напруги у вторинному колі здійснювався по спеціально відтарованому вольтметру типу М 4200/0÷600В та спеціально відтарованому амперметру типу М 4200/0÷75мА з шунтом ШВ-1/0÷30А які розміщено на пульті керування.

Оцінка величини тиску в камері для азотування здійснювалася за допомогою спеціально відтарованого іонізаційно-термопарного вакуумметра типу ВИТ-2 та мілівольтметра Шз1315.

Температуру в процесі вимірювали та контролювали за допомогою хромель-копелевого перетворювача манометричного термопарного типу ПМТ-2. Його показники реєструвалися цифровим мілівольтметром типу Шз1315.

Для проведення процесу іонно-плазмового азотування в імпульсному режимі і створення необхідної для процесу азотовмісної атмосфери

застосовувалися стандартні газові балони для азоту. Для проведення деяких дослідів також мали застосування стандартні газові балони для аргону та пропан-бутану. Всі виробничі гази повинні мати високу ступінь очистки та бути висушеними.

### **3.2. Принцип роботи установки для іонного азотування в імпульсному режимі**

**3.2.1. Принципова схема установки.** Установка для іонно-плазмового термочиклічного азотування (рис. 4.3.) складається з вакуумної місткості 1 де за допомогою спеціальної підвіски 2 підвішуються оброблювані деталі 3, на які подається від'ємний потенціал. Закриття кришки вакуумної місткості 1 контролюється датчиком контролю закриття кришки 4. В систему охолодження вмонтовано датчик контролю наявності води 10. При відсутності води в охолоджувальній системі чи незакритті кришки вакуумної місткості подається блокувальний сигнал на блок живлення 9 і струм розряду до вакуумної місткості не подається.

Вимірювання температури і тиску всередині вакуумної місткості відбувається за допомогою хромель-копелевого перетворювача манометричного термопарного типу ПМТ-2 (6) і спеціально відтарованого іонізаційно-термопарного вакуумметра типу ВІТ-2 (5) відповідно. Результати вимірювання подаються до блоку контролю і регулювання 7, звідки оброблений сигнал направляється до блоку живлення 9, задатчик температури 8 і клапан напуску азоту 15. Завдяки скерованому сигналу задатчика температури виконується регулювання робочої напруги блоку живлення, а отже відбувається керування температурним полем процесу азотування.

Відкачка атмосфери з вакуумної місткості відбувається за рахунок форвакуумного насосу НВПР -16-066 14 через клапан попередньої відкачки 12 та клапан вакуумної відкачки 13. Клапан попередньої відкачки слугує для запобігання виходу з ладу форвакуумного насосу та попереднього відкачування атмосфери з вакуумної місткості до тиску 100-150 Па. По досягненню визначеного тиску відкривається клапан вакуумної відкачки.

Для створення потрібної робочої атмосфери до вакуумної місткості подається робочий газ (азот, аргон) із балону 16. кількість газу регулюється клапаном напуску азоту 15.

Після закінчення процесу азотування і охолодження виробу в вакуумну місткість через повітрязабірник 18, повітряний фільтр 17 та клапан напуску атмосфери 11 подається атмосферне повітря до досягнення нормального атмосферного тиску. Після чого відбувається відкриття вакуумної місткості та добуваються оброблені деталі.

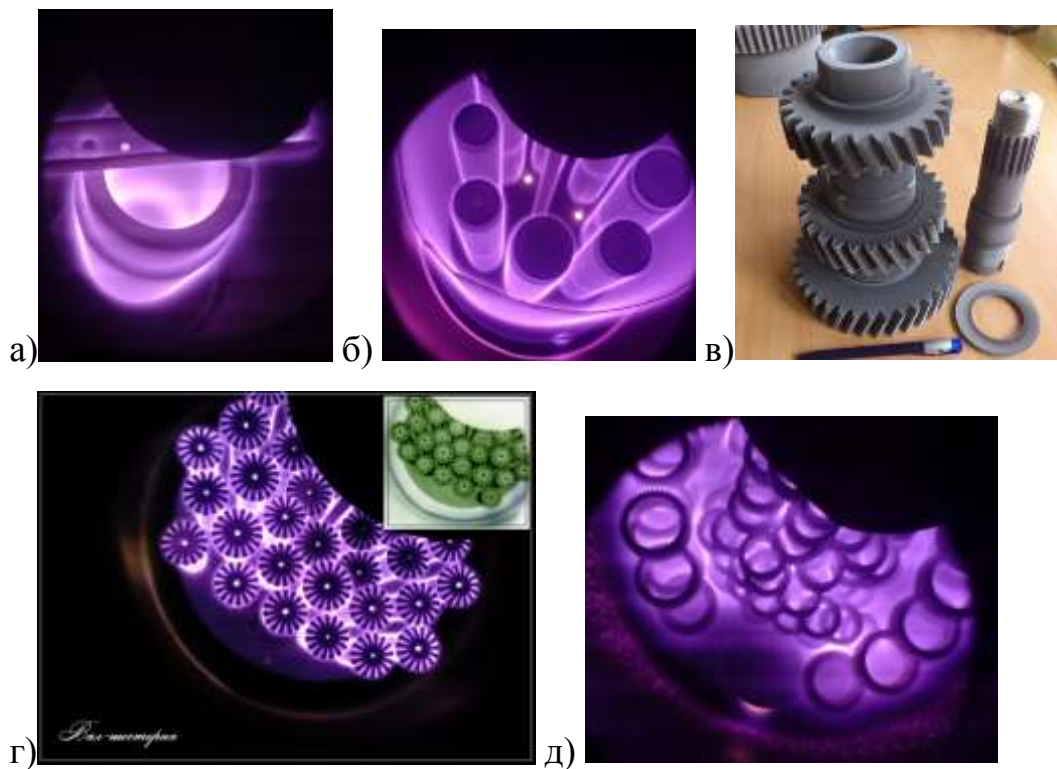


Рисунок 3.2 - Застосування ПТА для деяких деталей: а) гільза;  
б) шпинделя; в) шестерні і вал-шестерня; г) вал-шестерні; д) зубчасті  
колеса

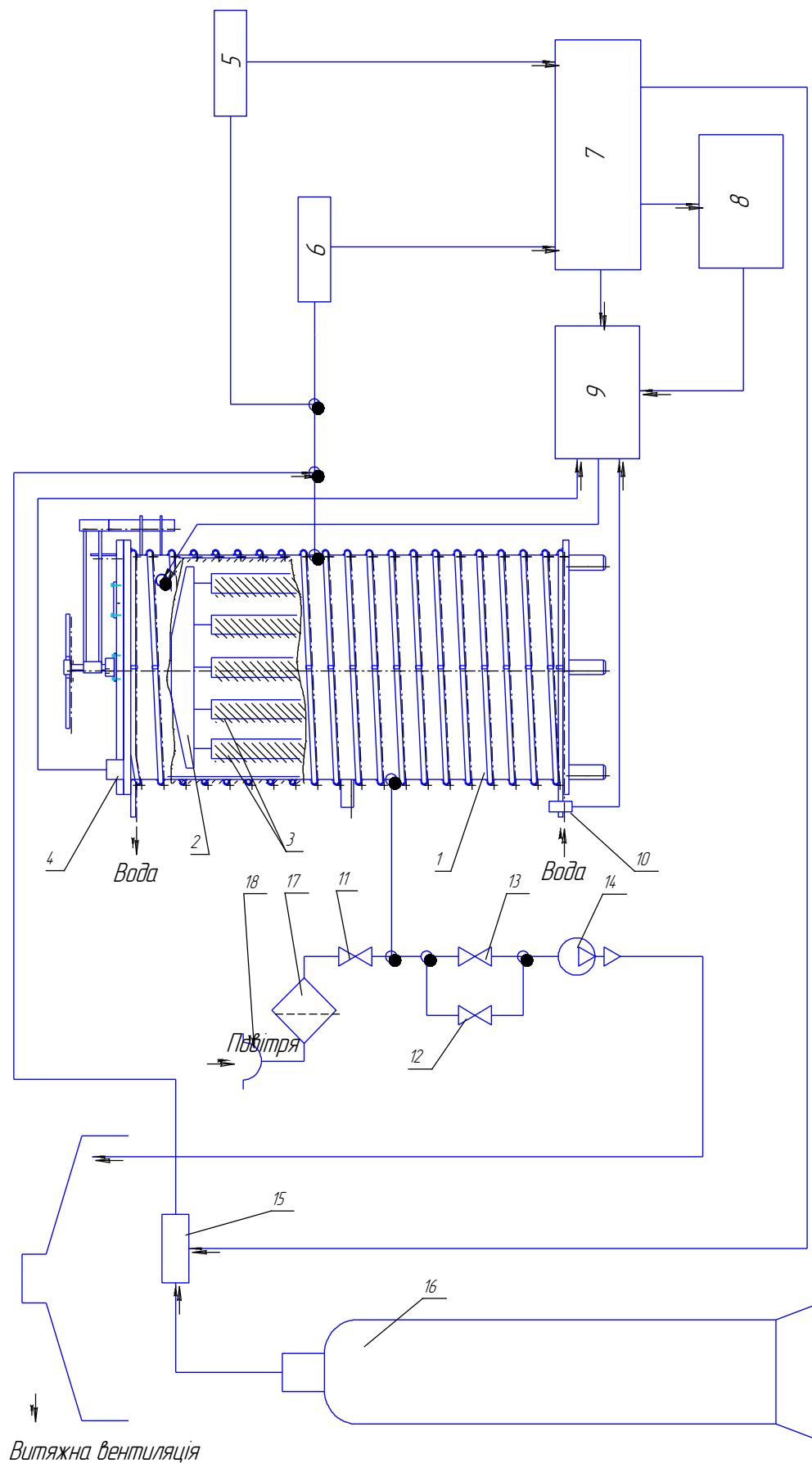


Рис. 4.1 Кінематична схема установки для іонно-вакуумного азотування в імпульсному режимі: 1-місткість вакуумна; 2-нагрівач; 3-оброблюваний деталі; 4-контроль зокриття кришки; 5-вимірвання тиску; 6-вимірвання температури; 7-блок контролю і регулювання; 8-задавач температури; 9-блок живлення; 10-контроль ваги; 11-клапан напуску атмосфери; 12-клапан попередньої відкачки; 13-клапан вакуумної відкачки; 14-форвакуумний насос; 15-клапан напуску азоту; 16-балон з газом; 17-подітряний фільтр; 18-подітряний насос



### 3.3. Технологічні можливості іонного азотування в зміцненні виробів з конструкційних і інструментальних сталей

Іонно-плазмове азотування (ІПА) - метод хіміко-термічної обробки виробів зі сталі та чавуну з великими технологічними можливостями, що дозволяє отримувати дифузійні шари потрібного складу шляхом використання різних газових середовищ, тобто процес дифузійного насичення управляємо і може бути оптимізований в залежності від конкретних вимог до глибини шару і твердості поверхні.

Температурний діапазон іонного азотування ширше, ніж газового і знаходиться в межах 400-600 0С. Обробка при температурах нижче 500 0С особливо ефективна при зміцненні виробів з інструментальних легованих сталей для холодної обробки, швидкорізальних і мартенситно-старіючих сталей, тому що значно підвищуються їх експлуатаційні властивості при збереженні твердості серцевини на рівні 55-60 HRC.

Зміцнюючої обробки методом ІПА піддаються деталі і інструменти практично всіх галузей промисловості (рис.3.3).



Табл. 3.3. Застосування іонно-плазмового азотування для зміцнення різних виробів

В результаті ІПА можна поліпшити такі характеристики виробів: зносостійкість, втомну витривалість, антизадирні властивості, теплостійкість і корозійну стійкість.

У порівнянні з широко використовуваними способами упрочнюючої хіміко-термічної обробки сталевих деталей, такими, як цементация, нитроцементация, ціанування і газове азотування в печах, метод ІПА має наступні основні переваги:

- більш висока поверхнева твердість азотованих деталей;
- відсутність деформації деталей після обробки і висока чистота поверхні;
- підвищення межі витривалості і збільшення зносостійкості оброблених деталей;
- більш низька температура обробки, завдяки чому, в стали не відбувається структурних перетворень;
- можливість обробки глухих і наскрізних отворів;
- збереження твердості азотированного шару після нагрівання до 600-650 °С;
- можливість отримання шарів заданого складу;
- можливість обробки виробів необмежених розмірів і форм;
- відсутність забруднення навколишнього середовища;
- підвищення культури виробництва;
- зниження собівартості обробки в кілька разів.

Переваги ІПА проявляються і в істотному скороченні основних витрат виробництва.

Так, наприклад, в порівнянні з газовим азотуванням в печах, ІПА забезпечує:

- скорочення тривалості обробки в 2-5 разів, як за рахунок зниження часу нагрівання та охолодження садки, так і за рахунок зменшення часу ізотермічної витримки;

- зниження крихкості зміцненого шару;
- скорочення витрат робочих газів в 20-100 разів;
- скорочення витрат електроенергії 1,5-3 рази;
- виключення операції депасивації;
- зниження деформації настільки, щоб виключити фінішну шліфування;
- простота і надійність екранного захисту від азотування незміцнюючих поверхонь;

- поліпшення санітарно-гігієнічних умов виробництва;
- повну відповідність технології всім сучасним вимогам з охорони навколишнього середовища.

**У порівнянні з загартуванням обробка методом ІПА дозволяє:**

- виключити деформації;
- збільшити ресурс роботи азотированного поверхні в 2-5 разів.

Застосування ІПА замість цементації, нітроцементації, газового або рідинного азотування, об'ємної або ТВЧ гарту дозволяє заощадити основне обладнання та виробничі площі, знизити верстатні і транспортні витрати, зменшити витрату електроенергії і активних газових середовищ.

Принцип дії ІПА полягає в тому, що в розрядженою ( $p = 200-1000$  Па) азотовмісними газовому середовищі між катодом - деталями - і анодом - стінками вакуумної камери - збуджується аномальний тліючий розряд, який утворює активну середу (іони, атоми, порушені молекули), що забезпечує формування азотированного шару, що складається з зовнішньої - нитридної зони і розташовується під нею дифузійної зони.

Технологічними факторами, що впливають на ефективність іонного азотування, є температура процесу, тривалість насичення, тиск, склад і витрата робочої газової суміші.

Температура процесу, площа садки, яка бере участь в теплообміні і ефективність теплообміну зі стінкою (кількість екранів) визначають потужність, необхідну для підтримання розряду і забезпечує потрібну температуру виробів. Вибір температури залежить від ступеня легування азотіруемой сталі нітрідоброобразующими елементами: чим вище ступінь легування, тим вище температура.

Температура обробки повинна бути як мінімум на 10-200С нижче температури відпустки.

**Тривалість і температура процесу** насичення визначають глибину шару, розподіл твердості по глибині і товщину нитридної зони.

**Склад насичує середовища** залежить від ступеня легування оброблюваної сталі і вимог до твердості і глибині азотированного шару.

**Тиск процесу** повинно бути таким, щоб забезпечувалося щільне «облегание» розрядом поверхні виробів і отримання рівномірного азотированного шару. Однак, при цьому слід мати на увазі, що розряд на всіх стадіях процесу повинен бути аномальним, тобто поверхню всіх деталей в коші повністю повинна бути покрита світінням, а щільність розрядного струму повинна бути більше нормальної щільності для даного тиску з урахуванням ефекту нагрівання газу в катодній області розряду.

З появою установок ИПА нового покоління, що використовують як робоче середовище регульовані за складом суміші водню, азоту та аргону, а так само плазму «пульсуючого», а не постійного струму, технологічність процесу іонного азотування істотно зросла.

Використання комбінованого нагріву («гарячі» стінки камери) або посиленою теплового захисту (потрійний теплозахисний екран) поряд з можливістю незалежно регулювати склад газу і тиск в камері дозволяють при обробці ріжучого інструменту уникнути перегріву тонких різальних крайок в процесі розігріву садки, точно регулювати час насичення а , відповідно, і

глибину шару, тому що розігрів виробів можливо проводити в безазотні середовищі, наприклад, в суміші  $Ar + H_2$ .

Ефективна теплоізоляція в робочій камері (потрійний теплозахисний екран) дозволяє обробляти вироби з низькою питомою енергоспоживанням, що дозволяє звести до мінімуму температурні відмінності всередині садки під час обробки. Про це свідчить розподіл мікротвердості по глибині азотированного шару для зразків, які перебували в різних місцях садки (рис. 3.4).

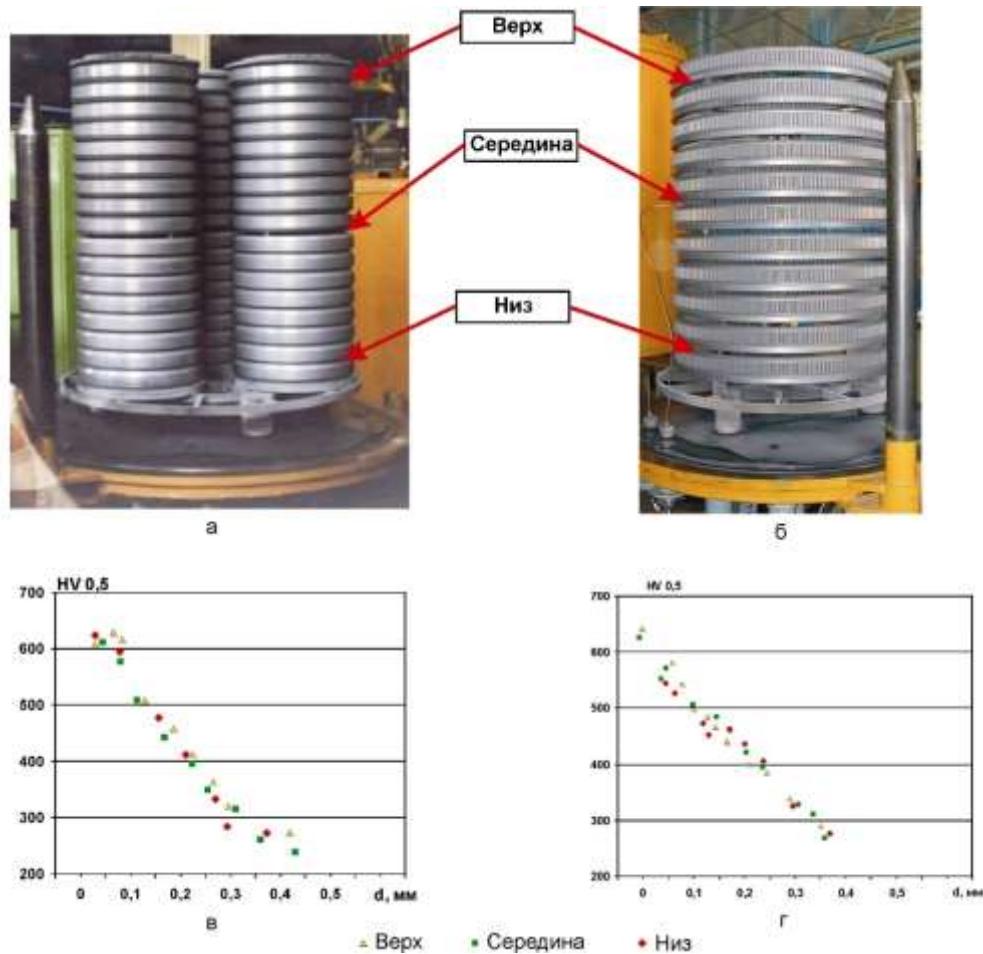


Рис. 3.4. Розподіл мікротвердості по глибині азотированного шару для трьох зразків розташовувалися в різних місцях садки.

а, в - шестерня масою 10,1 кг, 51 шт., ст - 40Х, модуль 4,5, витримка 16 годин,  $T = 530\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

б, г - шестерня масою 45 кг, 11 шт., ст - 38ХНЗМФА, модуль 3,25 (зовнішній вінець)

і 7 мм (внутрішній вінець), витримка 16 годин,  $T = 555\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Іонну Азотування - ефективний метод зміцнюючої обробки деталей з легованих конструкційних сталей: шестерень, зубчастих вінців, вал-зубчастих шестерень, валів, прямозубих, конічних і циліндричних шестерень, муфт, валів-шестерень складної геометричної конфігурації і ін.

Цементация, нитроцементация і ТВЧ-гарт виправдовують себе при виготовленні важко навантажених деталей (зубчасті колеса, осі, вали та ін.) Низької і середньої точності, що не вимагають подальшої шліфовки.

Зазначені види термообробки економічно недоцільні при виготовленні середньо- і нізконагнужених високоточних деталей, тому що при даній обробці спостерігається значне викривлення і потрібно подальша шліфовка. Відповідно, при шліфуванні необхідно знімати значну товщину зміцненого шару.

ІПА дозволяє істотно знизити викривлення і деформацію деталей при збереженні шорсткості поверхні в межах  $Ra = 0,63 \dots 1,2$  мкм, що дозволяє в переважній більшості випадків використовувати ІПА як фінішну обробку.

Стосовно до верстатобудування, іонну Азотування зубчастих коліс в істотній мірі знижує шумові характеристики верстатів, тим самим, підвищуючи їх конкурентоспроможність на ринку.

ІПА найбільш ефективно при обробці великосерійних одностипних деталей: шестерень, валів, осей, зубчастих валів, вал-зубчастих шестерень і ін. Шестерні, піддані плазмовому азотуванню, мають кращу стабільність розмірів в порівнянні з цементованного шестернями і можуть використовуватися без додаткової обробки. При цьому несуча здатність бічній поверхні і міцність основи зуба, що досягаються за допомогою плазмового азотування, відповідають цементованного шестерням (таб. 3.3).

Тип стали	Вид обробки	Межа витривалості при вигині, МПа	Межа контактної витривалості поверхні, МПа	Твердість бічній поверхні зубів, HV
-----------	-------------	-----------------------------------	--	-------------------------------------

Леговані	Зміцнення	200-350	570-920	200-400
Покращувані (40Х, 40ХН, 40ХФА, 40ХН2МА, 40ХМФА, 38ХМ, 38ХН3МФА, 38Х2Н2МФА, 30Х2НМ и др.)	Азотування	400-500	770-1200	350-650
Нормалізовані	Плазмова або індукційна гарт	250-400	980-1370	500-650
Спеціальні азотіруемые (38ХМЮА, 38Х2МЮА, 35ХЮА, 38ХВФЮА, 30Х3МФ и др.)	Азотування	520-690	1150-1450	700-850
Леговані	Цементация і нитроцементация	400-700	1250-1650	650-850

Таблиця 3.3 Характеристики опору втомі сталей в залежності від способів зміцнення зубчастих коліс

При упрочняющей обробці методом іонного азотування деталей з цементуемых, низько- і середньолегованих сталей (18ХГТ, 20ХН3А, 20ХГНМ, 25ХГТ, 40Х, 40ХН, 40ХФА і ін.) Необхідно на початку проводити поліпшення поковок - об'ємну загартування і відпустку до твердості 241-285 НВ (для деяких

сталей - 269-302 НВ), потім механічну обробку і на завершення - іонну азотування. Для забезпечення мінімальної деформації виробів перед азотуванням для зняття напружень рекомендується проводити відпал в атмосфері захисного газу, причому температура відпалу повинна бути вище температури азотування. Відпал слід проводити перед точної механічної обробкою.

Глибина азотированного шару, який формується на зазначених виробках, виготовлених із сталей 40Х, 18ХГТ, 25ХГТ, 20Х2Н4А та ін., становить 0,3-0,5 мм при твердості 500-800 НВ в залежності від марки сталі.

Для передач, що працюють в умовах більш важких навантажень, азотований шар повинен бути на рівні 0,6-0,8 мм з тонкою нитридною зоною або взагалі без неї.

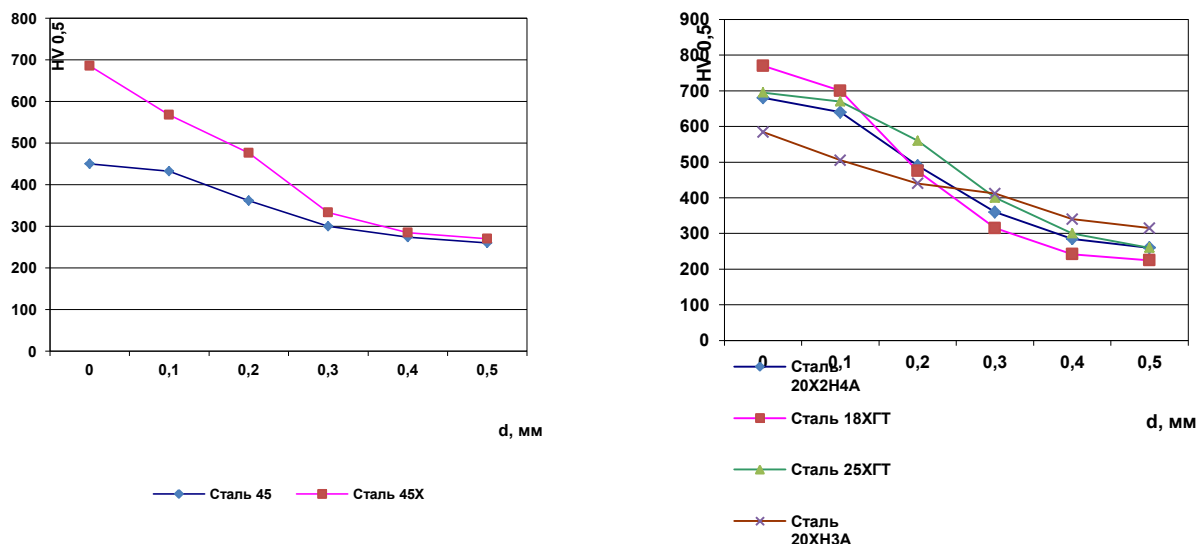


Рис. 3.5. Розподіл мікротвердості по глибині азотированного шару для різних сталей

Оптимізація властивостей зміцненого шару визначається сукупністю характеристик основного матеріалу (твердість серцевини) і параметрами азотированного шару. Характер навантаження визначає глибину дифузійного шару, тип і товщину нитридна шару:

- знос – □' - або □-шар;



- динамічне навантаження - обмежена товщина нітрідная шару або взагалі без нітрідная шару;
- корозія – □-шар.

Незалежне керування витратою кожного з компонентів газової суміші, тиском в робочій камері і варіація температурою процесу дозволяють формувати шари різної глибини і твердості, забезпечуючи тим самим стабільну якість обробки з мінімальним розкидом властивостей від деталі до деталі і від садки до коші.

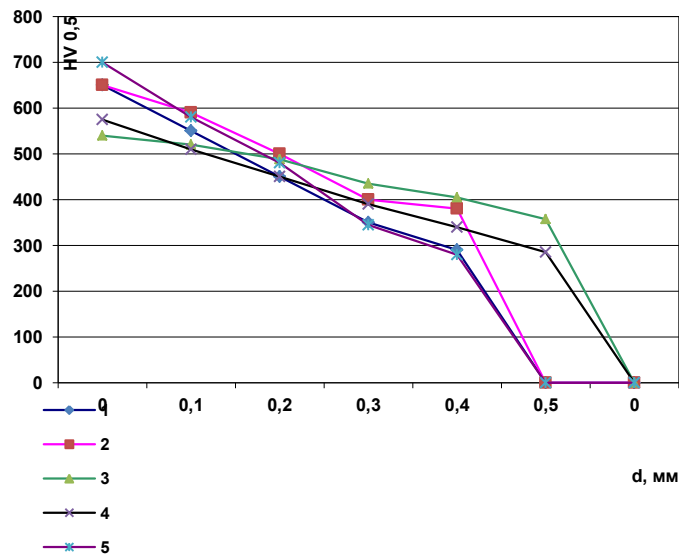


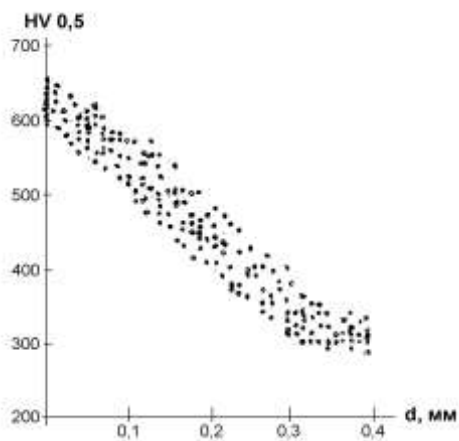
Рис. 3.5. Розподіл мікротвердості по глибині азотированного шару сталі 40X

1, 3, 5 – одностадійний процес;

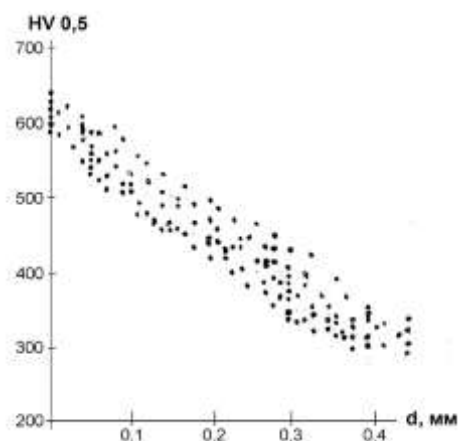
2,4 – двухстадійний процес по змісту  $N_2$  в робочій суміші

1,2 –  $T=530^{\circ}C$ ,  $t=16$  часов; 3 –  $T=560^{\circ}C$ ,  $t=16$  часов;

4 –  $T=555^{\circ}C$ ,  $t=15$  часов, 5 –  $T = 460^{\circ}C$ ,  $t = 16$  часов



а



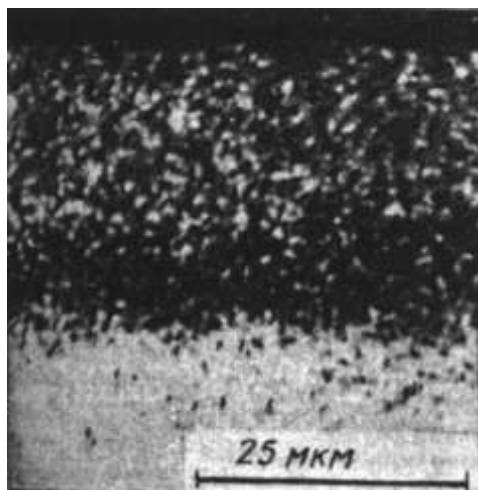
б

Рис. 3.6. Розкид мікротвердості по глибині азотированного шару для сталі 40Х (а) і 38ХНЗМФА (б) для серійних процесів.

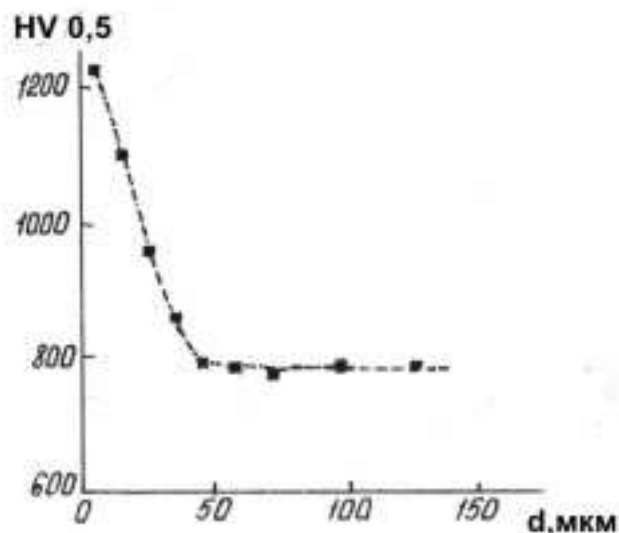
Іонну Азотування широко відомо і як один з ефективних методів підвищення зносостійкості різального інструменту, виготовленого з швидкорізальних сталей марки Р6М5, Р18, Р6М5К5, Р12Ф4К5 і ін.

Азотування підвищує зносостійкість інструменту і його теплостійкість. Азотований поверхню інструменту, що володіє зниженим коефіцієнтом тертя і поліпшеними антифрикційними властивостями, забезпечує більш легкий відведення стружки, а також запобігає її налипанню на різучі кромки і освіту лунок зносу, що дає можливість збільшити подачу і швидкість різання.

Оптимальною структурою азотированного швидкорізальної сталі є високоазотистих мартенсит, який не містить надлишкових нітридів. Зазначена структура забезпечується насиченням поверхні інструменту азотом при температурі 480-5200С в процесі короткочасного азотування (до 1 години). При цьому формується зміцнений шар глибиною 20-40 мкм з мікротвердістю поверхні 1000-1200 HV<sub>0,5</sub> при твердості серцевини 800-900 HV (рис. 6), а стійкість інструменту після іонного азотування збільшується в 2-8 разів залежно від його типу і виду оброблюваного матеріалу.



а



б

Рис. 3.7. Структура азотированного шару стали Р6М5 (а) і розподіл мікротвердості по глибині шару (б).

Головним достоїнством іонного азотування інструменту є можливість отримання тільки дифузійного зміцненого шару, або шару з монофазним нітридом  $\text{Fe}_4\text{N}$  ( $\square'$ -фаза) на поверхні, на відміну від класичного газового азотування в аміаку, де нітрідний шар складається з двох фаз -  $\square' + \square$ , що є джерелом внутрішніх напружень на межі розділу фаз і викликає крихкість і відшаровування зміцненого шару при експлуатації.

Іонну Азотування є також одним з основних методів збільшення довговічності штампового інструменту і литтєвий оснащення з сталей 5ХНМ, 4Х5МФС, 3Х2В8, 4Х5В2ФС, 4Х4ВМФС, 38Х2МЮА, Х12, Х12М, Х12Ф1.

В результаті іонного азотування можна поліпшити такі характеристики виробів:

- Кувальні штампи для гарячого штампування і прес-форми для лиття металів і сплавів - підвищується зносостійкість, зменшується прилипання металу.
- Прес-форми для лиття алюмінію під тиском - азотований шар перешкоджає прилипанню металу в зоні подачі рідкого струменя, і процес

заповнення форми є менш турбулентним, що збільшує термін служби прес-форм, а виливок виходить більш високої якості.

Істотно покращує іонну Азотування і експлуатаційні характеристики інструменту для холодної ( $T < 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) обробки - витяжка, гнучка, штампування, пресування, різка, карбування і прошивка.

Основні вимоги, що забезпечують високу працездатність такого інструменту - висока міцність при стисканні, зносостійкість і опір холодної ударної навантаженні - досягаються в результаті зміцнюючої обробки методом іонного азотування.

Якщо для інструменту використовується високохромиста сталь (12% хрому), то азотований шар повинен бути тільки дифузійним, якщо низьколеговані сталі - то додатково до дифузионному шару повинен бути  $\gamma$ -шар - твердий і пластичний.

Особливістю іонного азотування високохромистих сталей є те, що вибираючи температуру процесу можна в широких межах зберігати твердість серцевини виробу, що задається попередньої термічної обробкою (табл. 2).

Для отримання зносостійкого поверхневого шару при збереженні в'язкої серцевини штампа необхідно проводити спочатку загартування з відпусткою на вторинну твердість, розмірну обробку і потім іонну Азотування.

Для виключення або зведення до мінімуму деформацій, що виникають при іонному азотуванні штампового інструменту, перед остаточною механічною обробкою рекомендується проводити відпал в середовищі інертного газу при температурі як мінімум на  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  нижче температури відпустки.

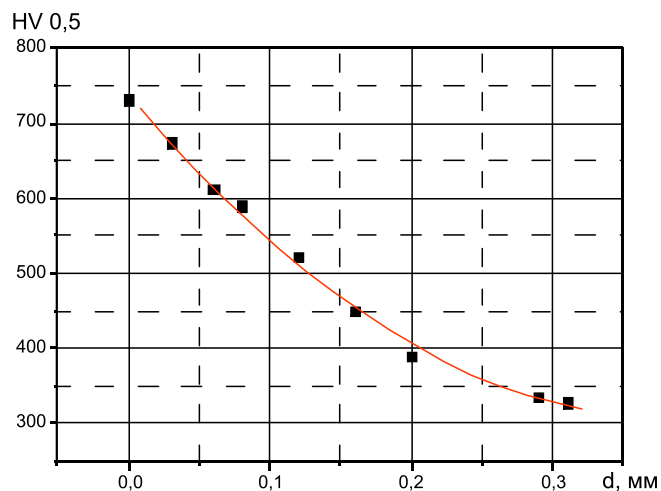
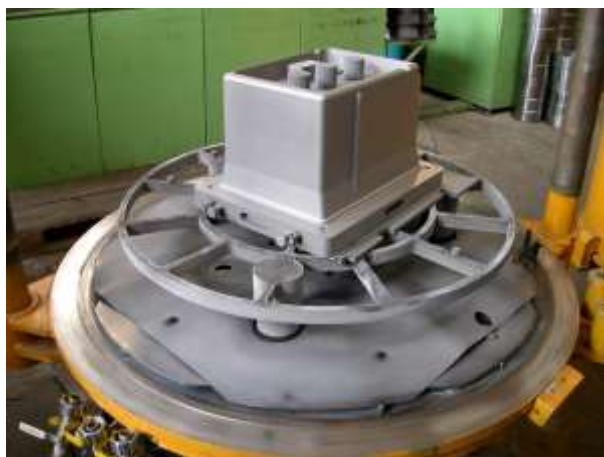
При необхідності застосовують полірування азотованих робочих поверхонь.

Марка сталі	Твердість серцевини, HRC	температура процесу $^{\circ}\text{C}$	Характеристики шару			Тип рекомєндованого шару
			Глибин а, мм	Пов. тв-сть, HV 1	Товщин а шару сполуки ,	

					мкм	з'єднан ь
<b>Сталі для горячої обробки</b>						
4X5МФ С	35-55	500-560	0,1-0,3	900-1100	2-6	$\gamma'$
5ХНМ	36-44	450-550	0,1-0,3	620-760	2-6	$\gamma'$
3Х2В8	35-50	500-560	0,1-0,25	950-1100	2-5	$\gamma'$
3Х3М3 Ф	35-51	500-560	0,1-0,3	900-1100	2-6	$\gamma'$
<b>Стали для холодної обробки</b>						
X12	50-55	450-520	0,1-0,2	1000- 1100	-	-
X12М	53-60	400-520	0,1-0,2	1000- 1200	-	-
X12Ф1	52-60	480-550	0,1-0,2	1000- 1250	-	-
X12МФ	56-58	400-480	0,1-0,2	1000- 1300	-	-

Таблица 3.3 Характеристики легованих сталей після іонно-плазмового азотування.

Варіюючи склад насичує середовища, температуру процесу і його тривалість можна формувати шари різної глибини і твердості (рис. 9,10).



пуансон масою 237 кг

В

ст. – 5ХНМ

а



прес-форма масою 1060 кг.

ст. – 5ХНМ

б

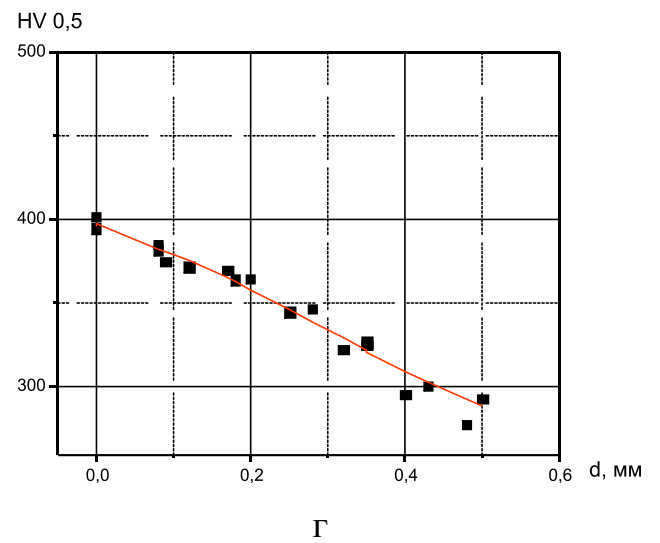
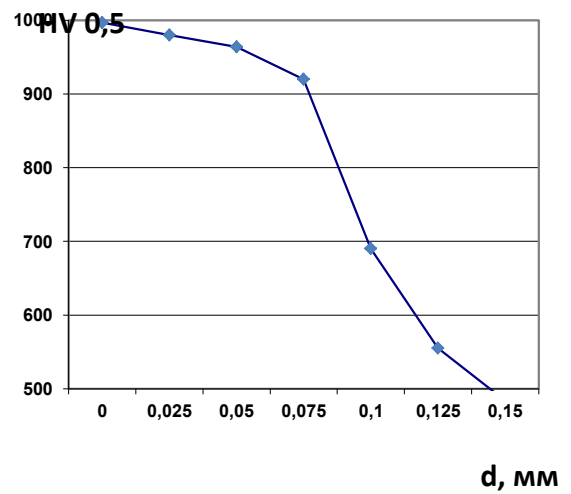
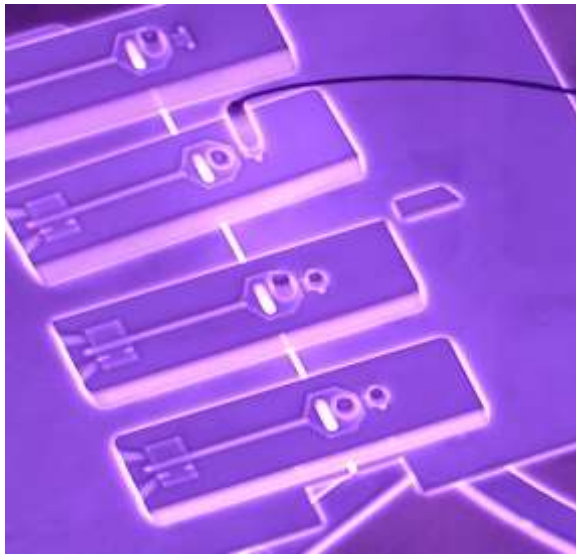
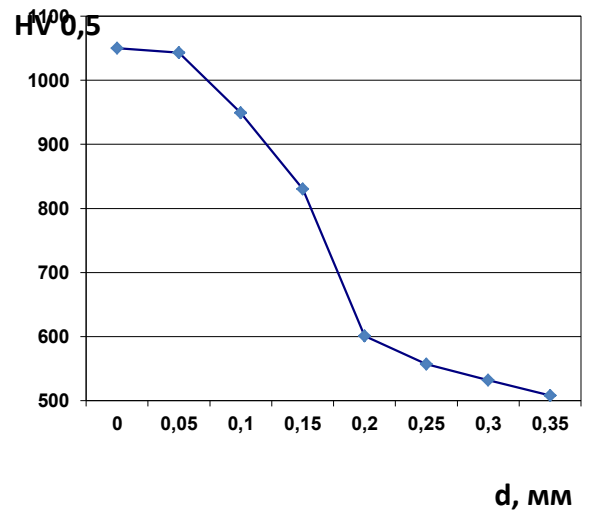


Рис. 3.8 Приклади обробки штампового оснащення (а, б) і розподіл мікротвердості по глибині азотированного шару (в, г).



а

б

Рис. 3.9. Приклади обробки ливарних форм зі сталі 4Х5МФС

а - вигляд виробу, б - розподіл мікротвердості по глибині азотированного шару.

Таким чином, як показує світовий досвід, застосування технології іонного азотування для зміцнюючої обробки виробів з конструкційних сталей, а так само ріжучого і штампового інструменту ця технологія є ефективною і відносно легко реалізовується, особливо із застосуванням плазми пульсуючого струму.

## IV РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

### 4.1 Розробка стартап-проекту

Розділ має на меті проведення маркетингового аналізу стартап проекту задля визначення принципової можливості його ринкового впровадження та можливих напрямів реалізації цього впровадження. Проведення маркетингового аналізу передбачає виконання нижченаведених кроків.

### 4.2 Опис ідеї проекту

Розробка та налагодження процесу азотування деталей для машинобудівних підприємств, зокрема для технологів.

Застосування такої продукції значно зменшить фінансові затрати на виготовлення деталей, а також скоротить час на технологічну підготовку, що є актуальними проблемами в наш час у машинобудуванні.

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробка та налагодження процесу азотування деталей	Машинобудування	Зменшення фінансових затрат та часу на технологічну підготовку

Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї (чим відрізняється від існуючих аналогів та замінників) порівняно із пропозиціями конкурентів передбачає:

Таблиця 4.2 - Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів	W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
1	Точність ре-	М і й П Р	-	-	+



	зультатів					
2	Низька вартість			–	–	+
3	Швидкість виготовлення			–	+	–
4	Продуктивність			–	–	+
5	Вузький діапазон застосування			+	–	–
6	Рентабельність			–	–	+
7	Наявність товару замітника			–	–	+

#### 4.3 Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу необхідно провести аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту (технології створення товару). Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз таких складових, табл. 4.3:

- За якою технологією буде виготовлено товар згідно ідеї проекту?
- Чи існують такі технології, чи їх потрібно розробити/додати?
- Чи доступні такі технології авторам проекту?

Таблиця 4.3 - Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Створення умов для забезпечення процесу	1. Створення бази даних інструментів	1. Наявні	1. Доступні
2		2. Розробка алгоритму вибору інструментів	2. Наявні 3. Наявні 4. Наявні	2. Доступні 3. Доступні 4. Доступні

		3. випробування 4. Її апробація		
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: єдина, що можлива для реалізації				

За всіма показниками проект можливо запустити.

#### 4.4 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Спочатку проводиться аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку, табл. 4.4.

Таблиця 4.4 - Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку	Характеристика
1	Кількість головних гравців	1
2	Загальний обсяг продаж	до 100 од. в місяць
3	Динаміка ринку	Стабільна
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Недовіра до продукції країн-виходців з ЄС та обмеження в застосуванні продукції
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Немає
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	91%

Надалі визначаються потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формується орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи.

Таблиця 4.5 - Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/ п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Вибір якісного обладнання	Технологи машинобудування	Немає	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Якість результатів</li> <li>- Низька ціна продукту</li> <li>- Зручність у використанні</li> <li>- Оновлення баз даних</li> </ul>

Після визначення потенційних груп клієнтів проводиться аналіз ринкового середовища: складаються таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають, табл. 4.6-4.7. Фактори в таблиці подані в порядку зменшення значущості.

Таблиця 4.6 - Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція
1	Недовіра новому	Недовіра до нового продукту на ринку	Вибір перевіреного товару конкурента в якості прототипу. Лабораторні тестування з відкритими результатами, Спонсорування відомих спортсменів
2	Не досконалість	Виявлення недосконалості в продукті порівняно з	Перегляд конструкції, усунення недоліків, заміна за гарантією

		продуктом конкурента	
3	Підвищення конкуренції	Поява в асортименті конкурентів аналогічної продукції	Патентування конструкції, створення унікального дизайну, підвищення об'ємів виробництва

Таблиця 4.7 - Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція
1	Розширення асортименту	Додавання в базу даних нових інструментів	Залучення цих можливостей в модернізацію програмного забезпечення

Аналіз пропозиції: визначаються загальні риси конкуренції на ринку

Таблиця 4.8 - Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
1. Тип конкуренції	Монополія	Зацікавити новітнім оригінальним та якісним продуктом
2. Рівень конкурентної боротьби	Локальна	Вихід продукту на міжнародний ринок
3. За галузевою ознакою	Внутрішньогалузева	Підтверджувати якість продукту
4. Конкуренція за видами товарів:	Товарно-видова	Підтверджувати якість продукту та оригінальність
5. За характером конкуренції	Цінова	Доступність продукту

рентних переваг		
6. За інтенсивністю	Марочна	Розвиток марки програмного продукту

Після аналізу конкуренції проводиться більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі

Таблиця 4.9 - Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Прямими конкурентами є інші методи	Бар'єром входу на ринок є створення загальної бази даних інструментів	Постачальник в даному проекті не використовується	Споживачі мають широку географію	Відсутній товар-замінники
Висновки:	Складно визначити інтенсивність конкуренції	Ця програма є перспективною, має можливість виходу на ринок, потенційних конкурентів мало	Сировина не використовується	Клієнти обирають з того що мають та не диктують умов	Немає обмежень через відсутність товарів-замінників

Отже, товари-замінники відсутні, конкуренція на міжнародному рівні наявна, але продукт перспективний, конкурентоспроможний і має можливість виходу на ринок.

Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

Таблиця 4.10 - Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспро-	Обґрунтування
-------	------------------------	---------------

	можності	
1	Недовіра новому	Недовіра до нового продукту на ринку
2	Не досконалість	Виявлення недосконалості в продукті порівняно з продуктом конкурента
3	Підвищення конкуренції	Поява в асортименті конкурентів аналогічної продукції
4	Розширення асортименту	Виготовлення нових інструментів
5	Стандартизація	Впровадження нових стандартів компонентів

За визначеними факторами конкурентоспроможності проводиться аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту, табл. 4.11.

Таблиця 4.11 - Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з іншими методами						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Недовіра новому	15							+
2	Не досконалість	14	+						
3	Підвищення конкуренції	16		+					
4	Розширення асортименту	19							+
5	Стандартизація	17				+			

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін.

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища.

Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (прогнозованими

результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення. Наприклад: зниження доходів потенційних споживачів – фактор загрози, на основі якого можна зробити прогноз щодо посилення значущості цінового фактору при виборі товару та відповідно, – цінової конкуренції (а це вже – ринкова загроза).

Таблиця 4.12 - SWOT- аналіз стартап-проекту

Можливості: Зменшення ціни на даний продукт, розширення асортименту бази даних, автоматичний вибір найдешевшого інструменту	Загрози: недовіра до марки, малий попит на продукт, збільшення конкурентів на ринку
---	---

На основі SWOT-аналізу розробляються альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок

Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів, табл 4.13.

Таблиця 4.13 - Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Доробка, усунення недоліків	+	Від 3х до 6ти місяців
2.	Публікація результатів лабораторних досліджень та тестів	+	Від 1го до 3х місяців
3.	Спонсорська підтримка спортсменів	+	Від 3х до 12ти місяців

## 4.5 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів.

Таблиця 4.14 - Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Просто-та входу у сегмент
1	Професійна група	±	+	+	±
2	Напівпроф. група	+	+	+	+
3	Аматорська група	+	±	-	+
Які цільові групи обрано: стратегія диференційованого маркетингу					

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформувати базову стратегію розвитку.

Таблиця 4.15 - Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
		Стратегія диференційованого маркетингу	Розширення лінійки виробів	Стратегія диференціації

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки

Таблиця 4.16 - Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є проект «першопрохідцем» на	Чи буде компанія шукати нових	Чи буде компанія копіювати основ-	Стратегія конкурентної поведін-
---------------------------------	-------------------------------	-----------------------------------	---------------------------------



ринку?	споживачів, або забирати існую- чих у конкурен- тів?	ні характери- сти товару конку- рента, і які?	ки
Так	Забирати існую- чих	Буде, стандарти- зовані характери- стики	Наслідування лі- дера

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки розробляється стратегія позиціонування, що полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект.

Таблиця 4.17 - Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до то- вару цільової аудиторії	Базова стра- тегія розвит- ку	Ключові конкуренто- спроможні позиції власного стартап- проекту	Вибір асоціа- цій, які мають сформувати комплексну позицію влас- ного проекту (три ключо- вих)
1	Якість, харак- теристики, зов- нішній вигляд	Стратегія диференціації	Масові характерис- тики	Новизна виро- бу, цінова полі- тика, якість ро- боти продукту , виключні хара- актеристики

#### 4.6 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього у потрібно підсумувати результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 4.18 - Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
1	Покращені характеристики	Автоматизований вибір інструментального забезпечення	Простіше і швидше
2	Низька вартість	Знижена собівартість виробу	Нижча ціна
3	Можливість вибору	Розширення лінійки	Ширший асортимент товару для всіх груп потенційних покупців

Надалі розробляється трирівнева маркетингова модель товару: уточнюється ідея продукту та/або послуги, його фізичні складові, особливості процесу його надання.

Таблиця 4.19 - Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові
I. Товар за задумом	Продуктом є програма, завданням якої є вибір інструментального забезпечення з найменшою ціною, виходячи з інформації G-коду оброблення деталі
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики
	Висока швидкість виконання роботи Широка база інструментального забезпечення в Excel
	Якість: регламентовано стандартами та нормативами ДСТУ

	Марка:            назва            організації-розробника «RudCom» + назва товару «Choose Best Tool»
III. Товар із підкріпленням	До продажу: програмний продукт
	Після продажу: гарантійне обслуговування
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: реєстрація торгової марки, промислового зразка, корисної моделі, винаходу, оригінальний вигляд .	

Після формування маркетингової моделі товару слід особливо відмітити – чим саме проект буде захищено від копіювання. Захист може бути організовано за рахунок захисту ідеї товару (захист інтелектуальної власності), або ноу-хау, чи комплексне поєднання властивостей і характеристик, закладене на другому та третьому рівнях товару.

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар (остаточне визначення ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту), яке передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або товари субституту, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів, табл. 4.20. Аналіз проводиться експертним методом.

Таблиця 4.20 - Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	Від 100\$	До 1000\$	800-400\$

Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення, табл. 4.21:

- Проводити збут власними силами або залучати сторонніх посередників (власна або залучена система збуту);
- Вибір та обґрунтування оптимальної глибини каналу збуту;
- Вибір та обґрунтування виду посередників.

Таблиця 4.21 - Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цілових клі- єнтів	Функції збуту, які має виконувати постача- льник товару	Глибина ка- налу збуту	Оптимальна система збуту
1		Збут власними силами	міжнародний	структурована
2	Збут через дилерів	Зберігання, сортуван- ня, встановлення кон- такту, інформування	міжнародний	структурована

Останньою складової маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів, табл 4.22.

Таблиця 4.22 - Концепція маркетингових комунікацій

№ п/ п	Специфі- ка поведі- нки ці- лових клієнтів	Канали ко- мунікацій, якими корис- туються ці- лові клієнти	Ключові пози- ції, обрані для позиціонуван- ня	Завдання ре- кламного по- відомлення	Концепція ре- кламного звер- нення
1	Пошук аналогів	Інтернет ме- режа	Доступність інформації про продукт	Новизна	Якість, харак- теристики та ціна

### **Висновки**

З аналізу даного стартапу видно, що він має усі перспективи стати успішним проектом. Значну роль в даному стартапі відіграє фактор новизни на ринку, що одразу приверне увагу потенційних покупців, і знизить конкуренцію на початкових етапах. Головною небезпекою є не виправдання очікувань споживачів, яку наважаться придбати новий продукт, це може звести нанівець усі зусилля прикладені до створення продукту. Тому проект потребує ретельної підготовки, тестувань. У випадку вдалого виходу на ринок відкриваються великі перспективи для розвитку проекту, такі як співпраця з відомими виробниками інструментального забезпечення, а на базі технологій та промислових потужностей можна пробувати свої сили у суміжних галузях.

## Висновок

Проведений аналіз літературних джерел дозволяє зробити наступні висновки:

1. Довговічність поверхонь тертя деталей машин, що експлуатуються в умовах абразивного зношування, знаходиться в прямій залежності від здатності протистояти абразивному або корозійно-механічному руйнуванню їх робочих поверхонь.

2. Традиційні методи азотування внаслідок високотемпературного нагрівання деталі не дозволяють зберегти властивості основи. Також виникають труднощі з отриманням рівномірного азотованого шару. Зміцнені деталі характеризуються значними термічними деформаціями і вимагають механічної обробки для отримання необхідної геометрії ріжучої кромки, що призводить до втрати зміцненого шару.

3. Одним із перспективних методів зміцнення поверхонь тертя деталей машин являється іонне азотування в імпульсному режимі, що дозволяє формувати поверхневий шар з високими фізико-механічними властивостями. Зате до нинішнього часу не розроблена технологія зміцнення поверхневих шарів іонним азотуванням в імпульсному режимі деталей машин, що виключає подальшу механічну обробку.

Виходячи із вищевикладеного, метою даної роботи являється дослідження і розробка процесу іонного насичення поверхонь деталей азотом в імпульсному режимі і визначення режимів зміцнення поверхонь тертя, що працюють в умовах абразивного зношування.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні задачі:

1. Розробити основні теоретичні положення процесу іонного азотування в імпульсному режимі.

2. Дослідити технологічні особливості іонного азотування в імпульсному режимі і розробити технологічні варіанти зміцнення робочих поверхонь деталей.

3. Визначити фізико-механічні властивості обробленого шару, що забезпечують необхідні експлуатаційні характеристики зміцнених деталей і розробити рекомендації по вибору оптимальних режимів процесу азотування.

Виявлено, що зниження температури азотування (в деяких випадках до 300°C) дає можливість повністю уникнути короблення деталей. Метод дозволяє отримати азотований шар з поверхневою зоною нітридів або без неї (шар нітридів характеризується підвищеною щільністю, що виключає кінцеву доводочну механічну обробку деталей –шліфовку, поліровку). Пульсація плазми дає можливість усувати локальні перегріви деталей завдяки більш рівномірному розподіленню плазми по поверхні деталі та отримувати рівномірний азотований шар поверхні виробу складної конфігурації.

Встановлено, що азотування в пульсуючому тліючому розряді проходить в 1,5-2,0 рази інтенсивніше в порівнянні з хіміко-термічною обробкою при радіаційному, пічному нагріві.

Виявлено також, що з підвищенням температури іонно-імпульсного азотування вище 600°C можливе зменшення товщини дифузійного шару внаслідок появи термоелектронної емісії на катоді. При цьому в загальному струмі розряду переважним стає електронний струм, доля іонного струму скорочується, що викликає зменшення кількості азотних іонів, що поставляється до анода і зменшення градієнту концентрації по азоту в шарі (при постійній потужності джерела струму).

Виявлено, що регулювання будови азотованого шару досягається зміною азотного потенціалу атмосфери, підтримуючи який на рівні розчинності азоту в тій чи іншій фазі, можна отримувати шар, який складається тільки з  $\alpha$ -твердого розчину, формувати на поверхні нижчий нітрид  $\gamma'$ -фазу, або отримувати  $\varepsilon$ -фазу із заданою концентрацією азоту. Отримання дифузійного шару на базі високоазотистого твердого розчину без поверхневої нітридної зони досягається за рахунок розчинення азоту аргонном в режимі катодного розпилення при тискові 39-78 Па. Введення аргону до 40% (об.) практично не впливає на товщину структурних складових шару. При вмісті аргону в суміші з азотом

більше 40% (об.) проходить зменшення поверхневої нітридної зони і збільшення зони внутрішнього азотування. При 80-90% (об.) аргону нітридний шар не утворюється, зона внутрішнього азотування росте прискорено. Подальше розчинення азоту аргонem знижує товщину шару.

Таким чином, в результаті експериментальних досліджень встановлено:

1. Найбільша інтенсивність зношування сталі 40X13 без зміцнення.
2. Вплив іонно-плазмового термоциклічного азотування підвищує зносостійкість сталі 40X13:
  - в піску - 3 рази;
  - у воді + пісок - 3,5 рази;
  - в солі + пісок - 2,5 рази.
3. Вплив іонно-плазмового ізотермічного азотування підвищує зносостійкість сталі 40X13:
  - в піску - 4 рази;
  - у воді + пісок - 2 рази;
  - в солі + пісок - 1,7 рази.
4. Найкращою зносостійкістю мають шари оброблені термоциклічним режимом азотування.

Метод ПТА дає можливість: отримувати шари заданого складу, збільшити твердість сталевих деталей до 900-1200 кг/мм<sup>2</sup> з традиційними методами ХТО; підвищити продуктивність процесу в 3-5 разів; сформувати поверхневий нітридний шар без мікротріщин.

Проведені випробування показали перспективність і доцільність застосування іонно-плазмового термоциклічного азотування для підвищення надійності деталей машин і механізмів,

Отримані дані про зносостійкість зміцнених шарів в умовах абразивного зношування свідчать про перспективність застосування методу ПТА для поверхневого зміцнення деталей машин і механізмів, що працюють в умовах абразивного зношування.



Розроблена конструкція напівавтоматичної установки для іонного азотування в імпульсному режимі, що забезпечує підвищення в 2...3 рази продуктивність процесу.

Технологія має наступні переваги:

- використовується нагрів тільки поверхневого шару деталі без прогріву її серцевини. Нагрівання відбувається за рахунок енергії тліючого розряду, тому немає необхідності використовувати печі;
- циклічні нагріви і охолодження деталі створюють термічні напруги в поверхневому шарі, що в 2-3 рази прискорює дифузійні процеси і відповідно скорочується час обробки;
- форма і розміри деталі і чистота її поверхні залишаються без змін, тому не потрібна фінішна механічна обробка;
- скорочення тривалості обробки, циклічний характер швидкісного дискретного енерговвода і нагрів тільки поверхневого шару скорочують витрати електроенергії до 10 разів.

### Список використаних джерел:

1. Калашников А.С. Технология изготовления зубчатых колёс / А.С. Калашников. М.: Машиностроение, 2004. - 479 с.
2. Калашников А. С. Современные методы чистовой обработки зубьев цилиндрических колес / А. С. Калашников //Металлообработка. Оборудование и инструмент для профессионалов. Международный информационно-технический журнал. – Харьков, 2007. – № 5. – С. 38-42.
3. Кривошея А.В. Финишная обработка цилиндрических зубчатых колес алмазными эластичными червячными хонами / А.В. Кривошея В.Е., Мельник В.В., Возный С.В., Рябченко В.Н., Бычихин Т.Е., Третьяк // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. Сборник научных трудов. – Вып. 19 – Киев: ИСМ им. В.Н.Бакуля, НАН Украины, 2016. – С.444 - 450.
4. Данильченко Ю.М., Кривошея А.В., Сторчак М.Г. Проектирование формообразующего оборудования и инструментальных систем для обработки зубчатых колес // Теория и практика зубчатых передач: Сборник трудов Международного симпозиума. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2014. – С.484-489.
5. Воронцов Б.С. Интерактивное управление синтезом зубчатых передач // Вестник НТУ "ХПИ": Сборник научных трудов. Тем.вып. "Проблемы механического привода". – Харьков: НТУ "ХПИ", 2005. – №40. – С.182-187.
6. ГОСТ 25142-82. Шероховатость поверхности. Термины и определения. - М.: Изд-во стандартов, 1982. – 20 с.
7. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. – М.: Изд-во стандартов, 1973. – 7 с.
8. Сагарда А.С. Алмазно-абразивная обработка деталей машин / А.С. Сагарда И.Х., Чеповецкий Л.Л., Мишнаевский М.М.: Изд-во «Техника», 1974 - 180 с.